

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Grado En Ingeniería Mecánica



Proyecto de Fin de Grado

**DISEÑO DE UN LANZADOR NEUMÁTICO
DE ALTA ENERGÍA**

Autor: Herrero Benavides, Miguel Ángel

Tutor: López Puente, Jorge

Jueves 12 de Junio de 2014



Agradecimientos:

Después de un largo camino en la universidad, hay mucha gente a la que me gustaría agradecer el apoyo mostrado en mi proyecto final.

Por eso, le dedico el proyecto a mi familia, tanto a mis padres como a mis hermanos, por aguantarme y ayudarme en todo momento.

También a mi tutor Jorge, por involucrarse tanto en el proyecto, y tener paciencia conmigo.



Resumen

El objetivo de este proyecto de fin de grado, consiste en el pre-diseño de un lanzador neumático de alta energía que funciona con aire elevado a una presión de 5'8 bares, para realizar ensayos de impactos con masas estimadas de entre 10 y 15 kilos, produciéndose una energía cinética elevada, para conseguir velocidades de hasta 200 metros por segundo. El lanzador neumático de alta energía, estará formado por un depósito, en el cual se almacenará el gas necesario para impulsar el proyectil, y un cañón de gran longitud, para que éste pueda adquirir la velocidad necesaria. Además, se diseñarán las bancadas del depósito, que dotarán a la estructura de estabilidad.

Para empezar con el pre-diseño, se partirán de modelos de lanzadores neumáticos similares, tanto de aire atmosférico, como otro tipo de gases, como Helio y Neón. De esta manera se verá el impacto en los lanzadores en función del gas, y el fenómeno físico que provoca que el proyectil se mueva. Con una idea previa y todos los fundamentos físicos necesarios sobre el proceso, se estimarán unas dimensiones iniciales para el lanzador, que irán acorde con las condiciones iniciales. Realizado un estudio previo de las masas y las velocidades con estas dimensiones, podremos saber la magnitud del problema, y la importancia de cada uno de los factores.

Acto seguido, se calcularán de manera exhaustiva todos los rozamientos producidos en el proceso y la importancia de cada uno de estos, para así poder recalcular la velocidad final de los proyectiles, usando un coeficiente de seguridad que nos permita evitar cualquier contratiempo. Sin embargo, existirán dimensiones que no podremos saber con este cálculo, como los espesores de las tapas del depósito y las bancadas, ya que estas dependerán de las tensiones producidas en el lanzador. Para realizar este cálculo, haremos uso del método de elementos finitos mediante la herramienta Abaqus, para optimizar la estructura todo lo posible, y que resulte lo más rentable posible.

Una vez optimizada la estructura, solo faltará mostrar las dimensiones finales del lanzador, y valorar la posibilidad de trabajos futuros sobre este proyecto.



Abstract

The purpose of this degree final project consists of the pre-design of a high-energy pneumatic launcher that works with high pressure air at 5'8 bars for testing impacts with estimated masses between 10 and 15 kilos, producing a high kinetic energy, to get speeds up to 200 meters per second. The high-energy pneumatic launcher, will consist of a tank, in which the required gas to propel the projectile will be stored, and an overlong cannon, in order to acquire the necessary speed. Additionally, tank supports will be designed, providing stability to the entire structure.

Firstly the pre-design will be made from similar pneumatic launcher models, both atmospheric air and other gases such as helium and neon. Thus the impact from launchers depending on the gas, and the physical phenomenon causing the projectile to move may be checked. With a previous idea and all the physical bases necessary for the process, initial dimensions for the launcher will be estimated, according to the initial conditions. Once we have made a preliminary study of the masses and velocities with these dimensions, we will be able to know the magnitude of the issue and the importance of each factor.

Afterwards, all the friction produced in the process will be calculated as well as the importance of each, in order to recalculate the final velocity of projectiles, using a safety factor that allows us to avoid any setback.

However, there will be dimensions that we won't be able to know with this calculation, as the thickness of tank tops and supports, as these depend on the stresses produced in the launcher. For this calculation, we will use the finite element method using the Abaqus software to optimize the structure as much as possible and make it as profitable as possible.

When the structure is already optimized, only remains to show the final dimensions of the launcher and evaluate the possibility of future works about this project.



ÍNDICE.

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	6
1.1	TIPOS DE LANZADORES NEUMÁTICOS	10
1.1.1	Cañón de gas ligero	10
1.1.2	Cañón de gas ligero electro-térmico	12
1.1.3	Cañón de combustión de gas ligero (CLGG)	12
1.1.4	Acelerador Ram	13
1.2	PRECEDENTES	15
1.2.1	Modelos y Ensayos de Impacto	15
1.2.2	Blindajes	16
1.3	COMPONENTES Y DESCRIPCIÓN DETALLADA	17
1.4	OBJETIVOS	20
2	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	21
2.1	DEPÓSITO	21
2.2	CAÑÓN	28
2.3	BANCADA DEL DEPÓSITO	29
2.4	ACOPLES	30
2.5	ORIFICIOS DE SALIDA	30
2.6	ACCIONAMIENTO NEUMÁTICO	32
3	VELOCIDADES	33
3.1	ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES INICIALES.	34
3.2	ROZAMIENTOS.	38
3.2.1	Rozamiento con la pared	39
3.2.2	Rozamiento Aerodinámico	44
3.2.3	Otros rozamientos	50
3.3	ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES FINALES	51
3.3.1	A presión del cañón constante	52
3.3.2	A presión del cañón variable	55
3.3.3	Resultados	59
3.4	OPTIMIZACIÓN	62
4	IMPLANTACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	65
4.1	MÓDULO PART	66
4.2	MÓDULO PROPERTY	69
4.2.1	Secciones	69
4.3	MÓDULO ASSEMBLY	70



4.4 MÓDULO INTERACTION	71
4.5 MÓDULO LOAD	71
4.5.1 Cargas.	72
4.5.2 Condiciones de contorno	74
4.6 MÓDULO MESH	74
4.7 MÓDULO VISUALIZATION	76
5 DIMENSIONES FINALES EN PLANOS Y DETALLES.	80
5.1 PLANO DE CONJUNTO	80
5.2 SECCIONES	81
5.3 ALZADOS	81
5.4 DETALLES	82
5.4.1 Detalle bancada depósito	82
5.4.2 Detalle acople cañón a depósito	82
6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	83
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84



1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En pre-diseño del lanzador neumático es complicado en el ámbito teórico por todos los cálculos que conlleva, y por tanto, no se puede comenzar a su diseño sin tener la información suficiente. Se hace necesaria una fuente de información fiable que explique todos los antecedentes de lanzadores neumáticos a la par que todo lo relacionado con la neumática.

Los sistemas neumáticos son utilizados en instalaciones fijas, ya que requieren de un aprovisionamiento continuo de aire, almacenado normalmente en compresores de aire. El aire por lo general está libre de humedad, y se añade una pequeña cantidad de aceite al compresor para evitar la corrosión y la lubricación de los componentes mecánicos.

Cualquier gas que no sea aire comprimido, puede presentar un peligro de asfixia en caso de fuga, como ocurre con el nitrógeno. El oxígeno por otro lado no presentaría este tipo de peligro, pero si sería inflamable, aparte de caro, además de no ofrecer ninguna ventaja de rendimiento sobre el aire.

El dióxido de carbono comprimido, es muy usado en herramientas portátiles y vehículos pequeños, debido a que en el cambio de fase entre líquido y gas se produce un cambio grande de volumen. Aún así es asfixiante y presenta peligro de congelación si no es ventilado correctamente.

Algunas de las ventajas del uso de accionamientos neumáticos, son las siguientes:

- Ofrecen una gran simplicidad en el diseño y en el control. Las máquinas se diseñan usando cilindros estándar con fácil control sobre su apagado y/o encendido.
- Los sistemas neumáticos tienen largas vidas operativas, además de requerir poco mantenimiento. Esto se debe a que al tratarse de gas compresible, se producen menos golpes en las estructuras, alargando así su vida.
- En caso de apagón, los aparatos neumáticos administrados con gas compresible, pueden funcionar más tiempo que los aparatos eléctricos.

Por estas y más razones, la neumática es una buena razón para diseñar un lanzador neumático, aunque la principal de todas sea las grandes dimensiones de la estructura a diseñar, que usando sistemas hidráulicos, tendrían un coste inasumible.



De manera obvia, cada accionamiento neumático funcionará con un gas diferente, ya sea aire comprimido, Helio, Neón, etc.

Cuando la velocidad es el aspecto más importante de estos sistemas, otros gases se tienen en cuenta, ya que la velocidad del sonido varía en función del medio, y por supuesto como no podría ser de otra manera, también en función de diferentes gases.

La velocidad del sonido depende del medio en el que se encuentra el objeto, y se produce cuando las ondas sonoras pasan de sónicas a supersónicas, produciéndose un fenómeno denominado explosión sónica. La velocidad del sonido, además de depender del medio de propagación, depende de las condiciones de temperatura. La expresión que sigue la velocidad del sonido para los gases, es la siguiente [1]:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Siendo γ el coeficiente de dilatación adiabática, R la constante universal de los gases, T la temperatura en grados kelvin y M la masa molar del gas. Los valores típicos para la atmósfera estándar a nivel del mar son los siguientes:

$\gamma = 1,4$ para el aire

$R = 8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K} = 8,314 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{mol}\cdot\text{K}\cdot\text{s}^2$

$T = 293,15 \text{ K}$ (20 °C)

$M = 0,029 \text{ kg/mol}$ para el aire

Por tanto, para unas condiciones de 25 °C la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s. A continuación veremos diferentes gases y la velocidad necesaria para que se alcance la velocidad del sonido en ellos en función de la temperatura.



Gas	Velocidad de propagación del sonido (m/s) a la presión de 1 atm
Aire (0° C)	331
Alcohol etílico (97° C)	269
Amoniaco (0° C)	415
Gas carbónico (0° C)	259
Helio (0° C)	965
Hidrógeno (0° C)	1284
Neón (0° C)	435
Nitrógeno (0° C)	334
Oxígeno (0° C)	316
Vapor de agua (134 °C)	494

Velocidades del sonido según el medio gaseoso [2].

Es por esa razón por la que muchos de los lanzadores neumáticos funcionan con otros gases como el Helio y el Neón.

El factor limitante de la velocidad de un lanzador neumático es la velocidad del sonido en el fluido de trabajo, o, en un gas ligero. Esto es esencialmente debido a que el proyectil es acelerado por la diferencia de presión entre sus extremos y, una onda de tal presión no puede propagarse más rápido que la velocidad del sonido en el medio. La velocidad del sonido en el helio es aproximadamente tres veces mayor que en el aire, y en el hidrógeno 3'8 veces mayor que en el aire.

La velocidad del sonido también aumenta con la temperatura del fluido (pero es independiente de la presión), por lo que el calor formado por la compresión del fluido de trabajo sirve para aumentar la máxima velocidad posible. Armas de aire de resorte y pistón aumentan la temperatura del aire en la cámara por calentamiento adiabático, que produce un aumento en la velocidad, para propulsar el proyectil a más de la velocidad de sonido en condiciones ambientales.



Cuando el proyectil disparado por un arma de gas impacta con su objetivo, la presión aplicada depende de la masa del proyectil. Obviamente, la presión aplicada también depende de la densidad del proyectil. Por eso el estudio de los materiales es fundamental, haciendo especial hincapié en su longitud y densidad.

Dado que los proyectiles se desplazan a una velocidad conocida, podemos estudiar la función que relaciona la longitud y la densidad, para así deducir la presión de impacto aplicada como una función del tiempo [3].

1.1 TIPOS DE LANZADORES NEUMÁTICOS

1.1.1 Cañón de gas ligero[4]

El cañón de gas ligero es un aparato para experimentos en física. Se utiliza generalmente para estudiar a alta velocidad los fenómenos de impacto, como la formación de cráteres de impacto o la erosión en materiales, aunque a veces se diseñan para crear altas presiones al impactar.

Un cañón de gas ligero funciona con el mismo principio que el resorte de un pistón de aire comprimido. Un pistón de diámetro grande se utiliza para empujar un fluido de trabajo (en este caso gaseoso), a través de un diámetro más pequeño que contiene el proyectil a acelerar. En un cañón de gas ligero, el pistón es accionado por una reacción química (por lo general pólvora) y el fluido de trabajo es un encendedor de gas, como el Helio o el Hidrógeno, aunque el Helio es mucho más seguro para trabajar, y causa menos erosión. El cañón está formado por un disco de ruptura, que actúa como una válvula cuidadosamente calibrada. Cuando se alcanza la presión deseada detrás del disco, este se abre permitiendo el paso del gas. De esta manera se asegura la máxima capacidad de energía.

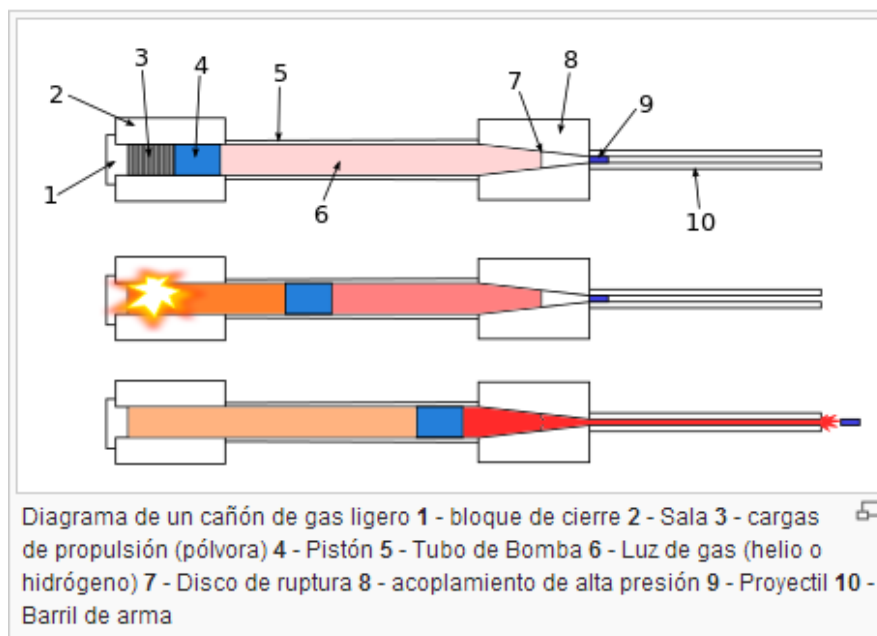


Diagrama de un cañón de gas ligero y sus correspondientes partes

Como ejemplo se pueden citar los cañones de La Nasa. La Nasa utiliza cañones de gas ligero de 40 mm de diámetro. En el extremo del cañón existe una sección cónica, que conduce al barril de 5 mm que dispara el proyectil. En esta sección cónica, el disco es de acero inoxidable y de 2 mm de espesor, con una X marcada en el medio. Cuando el hidrógeno desarrolla la presión suficiente para reventar la sección del marcado, el hidrógeno fluye a través del agujero y acelera el proyectil a una velocidad de 6 km/s (22.000 km/s), en una distancia de aproximadamente un metro.

La Nasa también opera con cañones de gas ligero con diámetros de entre 4,3 mm a 38 mm, y pueden lograr velocidades de entre 1000 m/s y 7000 m/s. El mayor de ellos consiste en uno de 159 mm de diámetro con un pistón de mas de 21 kg, que comprime hidrógeno.



Cañones de gas ligero en Arnold Air Force Base

Estos cañones utilizan tubos de lanzamiento intercambiables que van desde un diámetro interior de 84 mm hasta 200 mm. Las Velocidades del proyectil pueden alcanzar hasta 4,5 kilómetros por segundo para la configuración de 200 mm y hasta 7 kilómetros por segundo para la configuración del lanzador de 84 mm.



1.1.2 Cañón de gas ligero electro-térmico[4]

El cañón de gas ligero electro-térmico híbrido funciona con principios similares al cañón de gas ligero estándar, pero añade un arco eléctrico para calentar el gas de la luz a una temperatura y presión más altas.

El arco se aplica en la cámara que contiene el gas ligero, elevando la temperatura y la presión hasta el punto que el gas rompe el disco de ruptura y se enciende el propulsor detrás del pistón, que está perforado para permitir la ignición. La combinación resultante de la calefacción eléctrica y la compresión del pistón proporcionan altas presiones y temperaturas, lo que resulta en más potencia y una velocidad potencial más alta que la de un cañón de gas ligero estándar.

1.1.3 Cañón de combustión de gas ligero (CLGG) [5]

Un cañón de combustión de gas ligero es un arma de proyectiles que utiliza la fuerza explosiva de bajo peso molecular de los gases combustibles, como cuando el hidrógeno se mezcla con oxígeno como propulsor. Cuando se encienden los gases, estos se queman y expanden y propulsan el proyectil fuera del barril con una mayor eficiencia en relación a un propelente sólido.

Esta tecnología está siendo explorada en un intento por lograr mayores velocidades en la artillería. Las armas convencionales utilizan propulsores sólidos, generalmente de nitrocelulosa. El hidrógeno es típicamente la primera elección, sin embargo hay otros propulsores como el metano que se pueden utilizar. Aunque esta tecnología no parece proporcionar velocidades más altas, el principal inconveniente con propulsores gaseosos y líquidos para las armas de fuego es la dificultad de conseguir una velocidad inicial uniforme. La varianza de las velocidades iniciales afecta al rango, y esto es intolerable en armas de fuego.

La firma de investigación y desarrollo UTRON, Inc está experimentando con un diseño de cañón de gas ligero de combustión para uso en el campo. La empresa afirma tener un sistema listo para pruebas en el campo naval, como es el destructor clase Zumwalt. El cañón de riel, es un posible candidato para la tecnología naval. La empresa Utron ha construido cañones de combustión ya probados, con diámetros de 45 y 155 mm



Cañón 45 mm de la empresa Utron

1.1.4 Acelerador Ram[6]

Un acelerador de RAM es un dispositivo para la aceleración de proyectiles a velocidades extremadamente altas utilizando el motor-jet de los ciclos de propulsión como sobre la base de estatorreactor y los procesos de combustión.

Se componen de un tubo largo (barril) lleno con una mezcla de gases combustibles con un diafragma en cada extremo para contener los gases. El proyectil, es despedido por otros medios (por ejemplo, un cañón de gas ligero) supersónicamente a través del primer diafragma del tubo.

En un estatorreactor normal, el aire se comprime entre un cuerpo central en forma de pico y un carenado exterior, se añade combustible y quemado, y los gases de escape a alta velocidad se expanden a velocidades supersónicas fuera de la boquilla para generar empuje.

En un acelerador de RAM, un proyectil que tiene una forma similar a la del cuerpo central del estatorreactor se dispara, (a menudo de una pistola convencional) en el cañón del acelerador, causando la compresión entre el proyectil y las paredes del barril. El barril contiene una mezcla de combustible-aire gaseoso pre-mezclado. A medida que el proyectil acelerador RAM comprime la mezcla de combustible-aire, la combustión se estabiliza en la base del proyectil.



El diferencial de presión resultante genera una cantidad enorme de empuje que puede acelerar proyectiles a velocidades mayores a Mach-8. Por lo tanto, si se utilizan mezclas de propelentes con una velocidad del sonido de 1000 m / s (por ejemplo, H₂ rica en combustible -O₂ mezclas) son posibles velocidades de salida de más de 8.000 m / s.

Para abarcar una amplia gama de velocidades en un sistema típico acelerador Ram se utilizan propulsores de múltiples etapas con diferentes velocidades de sonido para mantener un alto rendimiento.

Las membranas o diafragmas que son fácilmente perforadas por el proyectil se utilizan para aislar las etapas del propulsante. Cada sección se llena con una mezcla de combustible-aire diferente para que las secciones posteriores tengan mayores velocidades de sonido. Como tal, el ariete se puede mantener a velocidades óptimas de Mach 3-5 (relativos a la mezcla que se desplaza a través) durante todo su período de aceleración.

Los aceleradores de Ram optimizados supersónicos pueden generar velocidades incluso mayores (Mach 6-8) debido a la capacidad para quemar combustible que todavía se está moviendo a una velocidad supersónica. La principal ventaja de un acelerador de RAM a través de una pistola convencional es su escalabilidad. En una pistola normal, la presión máxima se ejerce en el momento de la detonación de la carga inicial. A medida que el proyectil se mueve aguas abajo del cañón y el gas se expande detrás, la aceleración del mismo disminuye, llegando a valores pequeños, a los que un cañón más largo ya no estaría justificado.

Con un acelerador de la memoria Ram, el proyectil es impulsado principalmente por la presión generada en la reacción de los gases propulsores que se queman justo detrás del proyectil. Esto lleva a una presión constante que se ejerce tanto en el arma como en el propio proyectil. En consecuencia, las medidas de barriles son mayores que las de las armas convencionales, sin dejar de ofrecer una fuerte aceleración constante para el proyectil.

Uno de los usos propuestos para este tipo de lanzador, es el lanzamiento de cargas útiles al espacio.

1.2 PRECEDENTES [7]

La Universidad Carlos III es pionera en la construcción de lanzadores neumáticos. Por eso surge la necesidad de la construcción de uno mayor a los ya existentes para poder lanzar masas más grandes a las actuales.

Los lanzadores actuales que se encuentran localizados en el Laboratorio de Impacto en Estructuras Aeronáuticas, situado en el Parque Científico de la Universidad Carlos III de Madrid, permiten realizar una amplia variedad de estudios sobre problemas de impacto que aparecen en la industria aeronáutica y sobre blindajes óptimos en otros sectores. En estas instalaciones especializadas los científicos estudian cómo reaccionan elementos estructurales frente a cargas aplicadas, tanto a baja como alta velocidad.

Fenómenos de este tipo pueden ocurrir durante una operación de mantenimiento (la caída de una herramienta en una aeronave) o mientras los elementos están en funcionamiento. En el caso de un avión, por ejemplo, pueden producirse cuando un guijarro impacta en la aeronave durante el despegue, o si una laja de hielo se desprende de una hélice o del borde de ataque del ala e impacta contra el fuselaje.

1.2.1 Modelos y Ensayos de Impacto

Los estudios que se realizan permiten conocer mejor el comportamiento de las estructuras ante diversos tipos de impacto. En la actualidad, estos estudios implican reproducir modelos informáticos de las estructuras y analizar mediante simulaciones por ordenador lo que ocurre ante determinados choques. Para validar los modelos numéricos desarrollados resulta necesario realizar impactos sobre elementos estructurales reales en el laboratorio, en condiciones semejantes a aquellas en que se hallarían durante su funcionamiento.

Aquí es donde entran en juego los lanzadores neumáticos y cámaras fotográficas de alta velocidad con los que cuenta el laboratorio, pues permiten escudriñar cada detalle de las consecuencias que tiene la colisión de una laja de hielo contra una pieza de fibra de carbono del fuselaje de un avión, por ejemplo.

1.2.2 Blindajes

El laboratorio dispone de tres lanzadores con diferentes calibres. Los de menor diámetro consiguen alcanzar velocidades de impacto de hasta 1000 metros por segundo, o lo que es lo mismo, 3.600 kilómetros por hora, casi tres veces la velocidad del sonido. El último lanzador que se ha instalado, fabricado junto con la pyme VTI instalada en el entorno del Parque Científico de la UC3M, Leganés Tecnológico, tiene un calibre de 60 milímetros y permite lanzar objetos hasta 900 kilómetros por hora, una velocidad similar a la que alcanzan los aviones que realizan vuelos transatlánticos.

Los proyectiles que se lanzan habitualmente con este tipo de dispositivos suelen ser esféricos o cilíndricos. Esta nueva instalación permite lanzar otros tipos de objetos geométricos: cualquiera de peso inferior a 250 gramos y diámetro menor que el calibre del equipo puede ser empleado como proyectil. Esto ha permitido el lanzamiento de proyectiles de hielo con geometría prismática para simular el impacto del hielo desprendido de una pala de la hélice del motor o del borde de ataque de un ala contra el fuselaje de un avión.

Este tipo de trabajos tiene infinidad de aplicaciones prácticas porque son muchos los componentes que pueden sufrir impactos, desde la carcasa de un teléfono móvil, que debe resistir los golpes cuando cae al suelo, hasta los paneles solares, susceptibles de recibir el impacto del granizo.

Sus trabajos encuentran aplicación en el sector del transporte, ya que permiten mejorar las características de los cascos de motocicleta, los parabrisas de los coches o el fuselaje de trenes o aviones, donde la velocidad convierte cualquier objeto en un proyectil con capacidad de perforación.

1.3 COMPONENTES Y DESCRIPCIÓN DETALLADA

Para el diseño y dimensionamiento del lanzador neumático de alta energía, se cuenta con una nave industrial ubicada en el Parque científico de la Uc3m, con unas dimensiones de 40 metros de largo, 10 metros de ancho y 3 metros de alto, como la que se muestra a continuación:



Imagen de una nave industrial de dimensiones (40x10x3)

La nave industrial posee equipo industrial, además de un circuito neumático conectado a un compresor que dotaría al depósito de nuestro lanzador una presión de 5,8 bares. Sin embargo la presión de la instalación sería mayor para prevenir las perdidas. La nave consta de una entrada en el techo de tres metros de largo y 3 de ancho. Además, está dotada de una pluma con una capacidad máxima de 1 tonelada.



Pluma industrial



Por tanto, es de vital importancia decidir si la estructura se podrá transportar en una sola pieza, o se deberá de introducir por partes. En la nave citada, también se dispone de un soporte, capaz de sostener los materiales a ensayar, que normalmente serán componentes de avión, para comprobar la resistencia de los mismos contra proyectiles lanzados a gran velocidad.

Debido al gran tamaño de los proyectiles que se deben de lanzar, se hace inviable una construcción de un cañón de Helio, que efectivamente dotaría al proyectil de una velocidad increíble, pero que sería un coste verdaderamente inasumible, además de todos los cálculos que ello conllevaría.

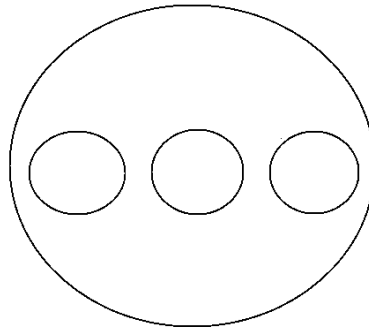
También se cuenta con unos acoples, con diámetros que oscilan entre los 30 y los 50 centímetros, que podrán usarse para realizar la conexión entre el depósito de aire comprimido y los cañones inmensamente largos. De esta manera, simplemente con orificios de salida del mismo diámetro, podemos obtener diferentes diámetros para el cañón de aire.

En lo que al cañón se refiere, el material usado para su fabricación será Acero comercial AISI 275, con un límite elástico elevado y un precio económico, para conseguir que la estructura sea lo más económica posible. Todas las partes del cañón serán fabricadas de chapa de este material para conseguir que sea lo más ligero posible, y, que pueda soportar todo el peso necesario.

La principal función del cañón es crear una depresión para dotar al proyectil de velocidad, por lo que la estructura debe de tener un depósito de aire comprimido con un volumen interior muy elevado, y un cañón por el que será realizado el lanzamiento. La unión de ambas partes se realizará con los acoples citados anteriormente. Para conseguir que se produzca tal depresión, el volumen del depósito del cañón debería de ser unas 30 veces mayor a la del cañón de lanzamiento.

Continuando con la explicación, el depósito del cañón se llenará de aire comprimido a una presión aproximada de 6 bares, llevada al cañón a través de un compresor situado en la nave industrial, que regula el paso al depósito a través de una válvula. También se requiere de una purga para expulsar el aire en caso de necesidad. También hay que destacar, que el cañón de aire comprimido constará de un acceso, para en caso de rotura, proceder a su reparación.

El depósito de chapa de acero, constará de 3 orificios todos del mismo diámetro, que serán unidos al cañón mediante los acoples para garantizar la mayor estanqueidad posible. Como es de suponer, también se hace necesario el uso de una bancada que pueda soportar todos los esfuerzos derivados del proceso, como el impacto del accionamiento neumático, el propio peso del cañón, etc.



Vista de los orificios de salida del depósito del lanzador

Además de la bancada del depósito, también se hará uso de unos soportes dispuestos de manera vertical para apoyar el cañón y situarlo a la altura deseada para que impacte en el punto justo en el que el material apoya en el soporte descrito con anterioridad.

Un componente indispensable para este proyecto es el accionamiento que va sujeto a una bancada interna unida al depósito y que, aunque está sometida a una presión de 6 bares, puede resistir la fuerza con facilidad. Dicho accionamiento es de tipo neumático y, va conectado a un circuito exterior del depósito y situado en la nave donde se emplaza la estructura. Una vez se determinen los diámetros de los orificios de salida del depósito, se podrá determinar el tamaño del accionamiento neumático para este tipo de trabajo, así como todas las especificaciones.

Por tanto, podemos resumir todos los componentes necesarios para la construcción del depósito en las siguientes líneas:

- Depósito de chapa de acero S275 de alto volumen con acceso.
- Bancada de chapa de acero S275 para soportar el depósito.
- Cañón de chapa de acero S275 de una gran longitud.
- Soportes en forma de media luna para soportar el cañón.
- Accionamiento neumático de grandes dimensiones.
- Circuito neumático.
- Compresor de aire para llevar el aire al depósito.
- Acoples para unir el depósito con el cañón.

De manera justificada y mediante el uso de cálculos teóricos, se realizará el diseño de la mayoría de los componentes, empezando por el depósito y el cañón, y terminando por las bancadas del depósito. El diseño de componentes como las bancadas de media luna para soportar el cañón, y todo lo relacionado con la parte neumática quedará en un segundo plano.



1.4 OBJETIVOS

El principal objetivo del proyecto es la realización de ensayos de impactos a alta velocidad. Para conseguir el efecto necesario, las masas que lanzadas deben oscilar entre 10 y 15 kg. Por tanto el diámetro necesario del cañón debe ser lo suficientemente grande para que el proyectil circule dentro de él.

La velocidad de impacto deseada oscilará entre 150 y 200 m/s, y se dispone de hasta 30 metros de cañón para poder conseguirlo.

En este proyecto se tratará con especial importancia el estudio de los rozamientos producidos dentro del cañón, ya que es la principal causa de la pérdida de la mayor parte de la fuerza que se libera en el cañón, y que por tanto provoca una brusca deceleración brusca en el proyectil.

Para realizar el modelo práctico del cañón haremos uso del método de elementos finitos, mediante la plataforma ABAQUS, y se mostraran todos los pasos y modelos resueltos con sus correspondientes gráficas. En cuanto a los rozamientos, se mostrarán todos los cálculos teóricos realizados para llegar de manera correcta a la solución del problema, y al correcto diseño y optimización de un cañón de aire, que aparte de ser económico, deberá ser seguro, fiable y rentable.



2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

2.1 DEPÓSITO

Antes de comenzar con el diseño, debemos conocer las condiciones iniciales del problema, para a partir de ahí, deducir todo lo que sigue.

Para realizar el diseño del cañón, partimos de modelos anteriores a escala reducida. Dichos modelos usan tanto el Helio, como aire para dotar al proyectil de velocidad. En nuestro caso, dado que el objetivo es realizar un diseño para lanzar materiales más grandes, el elemento usado será aire atmosférico a presión elevada. Dicha presión, es de exactamente 5'8 bares, que se proporciona mediante un compresor.

La parte inicial del diseño, es estimar las dimensiones del proyecto, esto quiere decir estimar la longitud, espesor y dimensiones en general, tanto del depósito como del cañón, para que a la vez de rentable, resulte ligero. Sin embargo habrá partes del diseño que no se podrán calcular hasta el final.

El material empleado será acero al carbono comercial S275, elegido por su alta resistencia y su bajo coste. Dado que es un material con una densidad elevada, el espesor del lanzador no debe ser muy exagerado. Se construirá de chapa y se trasladará por partes hasta la nave, para que pueda montarse como ya hemos dicho con la pluma del almacén.

Ya se conocen por tanto, las dimensiones del emplazamiento, el material inicial, y las condiciones generales para empezar el diseño. El objetivo es optimizar el lanzador para que resista los rozamientos y las condiciones atmosféricas, cosa que no es muy complicada, ya que una presión de 5,8 bares, no implica cambios significativos. Antes de establecer las dimensiones del lanzador, es preciso realizar un breve estudio partiendo de las condiciones iniciales.

Lo que parece claro es que para comenzar, es necesario saber el volumen de aire que se necesita a presión elevada de 5,8 bares dentro del depósito, para provocar una fuerza tal, que impulse el proyectil a través del cañón del lanzador.

Para empezar a diseñar, se debe tener conocimiento previo de las condiciones a las que está sometido el tipo de material del que se fabricará, el emplazamiento del propio cañón, etc. El lanzador se emplazará en una nave subterránea a temperatura ambiente, por tanto no estará sometido a cambios bruscos provocados por la temperatura.



El elemento usado para impulsar el proyectil es aire atmosférico, elevado a una presión exacta de $P = 5,8$ bares, gracias a un compresor conectado al depósito del cañón. El material a usar, es acero al carbono comercial, más concretamente el S240 JR con un límite elástico de $\sigma_y = 240 \text{ MPa}$.

El funcionamiento del lanzador neumático es indispensable para evaluar las fuerzas producidas en la estructura. El lanzador está compuesto por un depósito y un cañón, a través del cual circula el proyectil. El lanzamiento se produce al generarse una fuerza gracias a un accionamiento neumático situado en el interior del depósito. Al liberarse el pistón del accionamiento neumático, se produce una depresión aguas arriba y aguas abajo, que produce que el proyectil adquiera una determinada velocidad. Para que esto suceda, es necesario que el Volumen del depósito sea muy superior al del propio cañón. Para calcularlo se escoge el caso más desfavorable, ya que no será usado un solo diámetro para el cañón del lanzador neumático.

Se sabe que el diámetro máximo del cañón, para que puedan lanzarse materiales de una masa elevada, debe de ser de aproximadamente 50 cm de diámetro y unos 20 metros de longitud. Por tanto, el volumen interior del cañón es:

$$V_{\text{interno cañon}} = \frac{\pi * D^2}{4} * L = \frac{\pi * 0,4^2}{4} * 20 = 3,927 \text{ m}^3$$

Consideramos por tanto, que para que se produzca una depresión importante, el volumen del depósito debe de ser de aproximadamente de entre cinco y diez veces mayor a la del cañón. Esto quiere decir, que el volumen del depósito debe de ser de aproximadamente:

$$V_{\text{interno depósito}} = 15 \text{ m}^3 - 30 \text{ m}^3$$

Una vez obtenido el volumen del depósito se puede realizar una estimación comparando las dimensiones y el peso del mismo, para saber cuál es la opción más rentable de todas. Sabiendo que el límite elástico del acero es el punto máximo en el que la deformación es elástica (recuperable) se puede realizar una estimación basándose en las ecuaciones de las tensiones básicas de un cilindro.

Dado que el espesor del depósito no superará la decima parte de su radio, es posible aplicar la teoría de pared delgada. Esto permite tratar la pared delgada como una superficie, para al usar la ecuación de Laplace – Young, y así obtener la tensión circunferencial. Las tensiones en un cilindro, aplicando la teoría de pared delgada, y sometido a una presión interna P_{int} , se escriben como sigue:



- Tensión radial: $\sigma_r = -P_{int}$
- Tensión circunferencial: $\sigma_\theta = \frac{P_{int} \cdot r}{e}$
- Tensión axial: $\sigma_z = \frac{P_{int} \cdot r}{2e}$

La tensión circunferencial es la tensión resultante de una presión interna, y por tanto, es la que se usará a partir de ahora. Se puede por tanto igualar la tensión circunferencial del cilindro con el límite elástico del acero. De esta manera, se tiene que:

$$\sigma_\theta = \sigma_y = 240 \text{ MPa}$$

Como no podría ser de otra manera es necesario dejar un coeficiente de seguridad lo suficientemente grande como para que no se produzcan contratiempos en el cañón. Parece adecuado escoger un coeficiente de seguridad de 3. Con este coeficiente de seguridad se recalcula la tensión circunferencial para obtener así la máxima real permitida en nuestro lanzador neumático.

$$\sigma_{\theta \text{ real}} = \frac{240 \text{ MPa}}{3} = 80 \text{ MPa}$$

Aplicando entonces las ecuaciones de las tensiones, con teoría de pared delgada y para un cilindro sometido a una presión interna, se puede realizar una estimación aproximada de los radios, los espesores, la longitud, y por tanto el peso. A continuación, se explica como.

Ya que tanto la presión interna, como la tensión circunferencial real son conocidas, aplicando la formula de la tensión circunferencial, $\sigma_\theta = \frac{P_{int} \cdot r}{e}$, se deducen el resto de las variables, simplemente dando valores al radio. Una vez obtenidos el espesor y el radio, obtener la longitud del depósito solo requiere la aplicación de una fórmula.

$$V_{int \text{ dep}} = \frac{\pi * D_{int}^2}{4} * L_{dep} \rightarrow L_{dep} = \frac{4 * V_{int \text{ dep}}}{\pi * D_{int}^2}$$

Y una vez obtenida la longitud del depósito, es posible obtener el peso para realizar un estudio a fondo que determine cuál es la mejor solución posible. El peso del depósito se obtiene mediante la típica fórmula:

$$\rho = \frac{M}{V} \rightarrow M = \rho * V$$

Donde el volumen del depósito se obtiene sumando también los volúmenes de las tapas, que coinciden con el radio interno del cilindro más el espesor lateral. Sin

embargo, el espesor de las tapas será diferente al del cilindro del depósito, ya que los fenómenos que ocurren en esa zona son totalmente desconocidos hasta el momento. Aunque para un cálculo previo se asumirá que el espesor de las tapas coincide con el del cilindro del depósito.

$$V_{dep} = V_{tapas} + V_{cilindro} = 2 * \pi * (R_{int} + e)^2 * e + \pi * ((R_{int} + e)^2 - R_{int}^2) * L_{dep}$$

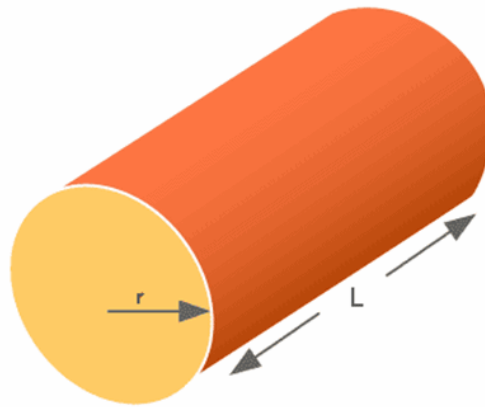


Imagen del depósito con las tapas

Desarrollando la ecuación y despreciando el término e^2 , tenemos que:

$$V_{dep} = 2 * \pi * (R_{int}^2 + 2 * R_{int} * e) * e + \pi * 2 * R_{int} * e * L_{dep}$$

La masa del depósito se calcula entonces:

$$M_{dep} = \rho * 2 * \pi * (R_{int}^2 + 2 * R_{int} * e) * e + \pi * 2 * R_{int} * e * L_{dep}$$

A continuación se muestra una estimación realizada en Excel, otorgando valores al radio para determinar el espesor y seguidamente determinar la longitud del depósito.



Datos de partida:

$\sigma_y (MPa)$	$P_{interna} (Pa)$	$V_{interno\ deposito} (m^3)$	Coef seguridad
240	580000	30	3

A continuación se muestra la estimación realizada, con un intervalo de radios de entre 0,1 (por tratarse del mínimo posible para un depósito) y 2,5 metros (por tratarse del máximo de altura del almacén en el que se ubicará el depósito) y asumiendo que los espesor de las tapas y del cilindro coinciden por el momento.

Estimación:

$\sigma_{real} (MPa)$	$R_{interno} (m)$	espesor(m)	$L_{deposito} (m)$	Peso(Kg)
80	2,5	1,81E-02	1,527887454	9025,28
80	2,25	1,63E-02	1,886280807	7498,94
80	2	1,45E-02	2,387324146	6276,73
80	1,8	1,31E-02	2,947313761	5495,24
80	1,7	1,23E-02	3,304254874	5163,97
80	1,6	1,16E-02	3,730193979	4869,47
80	1,5	1,09E-02	4,244131816	4609,57
80	1,4	1,02E-02	4,872090095	4382,12
80	1,3	9,43E-03	5,650471352	4184,94
80	1,2	8,70E-03	6,631455962	4015,89
80	1,1	7,98E-03	7,891980649	3872,78
80	1	7,25E-03	9,549296586	3753,47
80	0,9	6,53E-03	11,78925504	3655,78
80	0,8	5,80E-03	14,92077591	3577,56
80	0,7	5,08E-03	19,48836038	3516,64
80	0,6	4,35E-03	26,52582385	3470,86
80	0,5	3,63E-03	38,19718634	3438,06
80	0,4	2,90E-03	59,68310366	3416,07
80	0,3	2,18E-03	106,1032954	3402,73
80	0,2	1,45E-03	238,7324146	3395,88
80	0,1	7,25E-04	954,9296586	3393,36

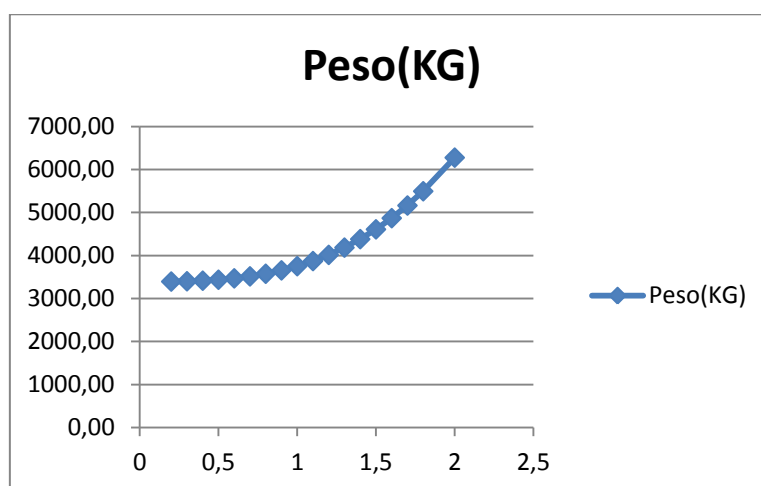
Al observar los valores detenidamente se puede observar que, obviamente, al aumentar el radio del depósito disminuye la longitud del mismo, pero aumenta el espesor de la pared. Esto se produce porque al ser menor la longitud, la presión se concentra en un espacio menor del área lateral del depósito, lo que conlleva que el espesor sea más grande para compensar los valores de las tensiones, y evitar así las roturas.



Al disminuir el radio, aumenta la longitud y disminuye el peso, lo que quiere decir que el área que interviene menos en el peso de las dos, en las mismas condiciones, es la lateral. Para realizar un estudio más exhaustivo, a continuación se analiza la principal franja, que son los valores más adecuados para el diseño del depósito.

<i>Radio (m)</i>	<i>Peso (Kg)</i>
2	6276,73
1,8	5495,24
1,7	5163,97
1,6	4869,47
1,5	4609,57
1,4	4382,12
1,3	4184,94
1,2	4015,89
1,1	3872,78
1	3753,47
0,9	3655,78
0,8	3577,56
0,7	3516,64
0,6	3470,86
0,5	3438,06
0,4	3416,07
0,3	3402,73
0,2	3395,88

Con la tabla anterior, es posible dibujar una gráfica que muestre de manera aproximada la tendencia de crecimiento del peso de la estructura con el radio.



$$y = 1514x^2 - 2077x + 4322,6$$

De la gráfica se abstrae que a partir de un metro de radio, el aumento del peso del cañón sigue una tendencia exponencial. Por tanto, parece claro concluir, que el radio seleccionado debe ser el de 1 metro, por su bajo peso, el delgado espesor de la pared, y las perfectas dimensiones para poder construirlo dentro de la nave.

Por motivos de simplificación, escogeremos una longitud de 10 metros, que provocará que el volumen interno del depósito sea mayor, y por tanto aumente la depresión en el cañón. Por tanto, las condiciones iniciales elegidas para nuestro diseño, son las que siguen:

$\sigma_{real}(MPa)$	$R_{interno}(m)$	$espesor(m)$	$L_{deposito}(m)$
80	1	7,25E-03	10

Realizando una cuenta rápida, y siguiendo las especificaciones dichas anteriormente, resulta que el peso y el volumen interno del depósito tienen un valor de:

$V_{int dep}(m^3)$	$Peso (Kg)$
31,416	3913,61

Sin embargo, cabe destacar que todas las partes del depósito no están sometidas a la misma presión. En el caso del cilindro la presión se distribuye de manera uniforme y su resistencia puede ser calculada numéricamente como ya hemos visto. Pero el cálculo de las dimensiones de las tapas es más complejo. La principal razón de esto es porque se aplica una presión que se distribuye en toda la superficie de la tapa, y se hace necesario el uso de ecuaciones diferenciales complejas para el desarrollo del problema.

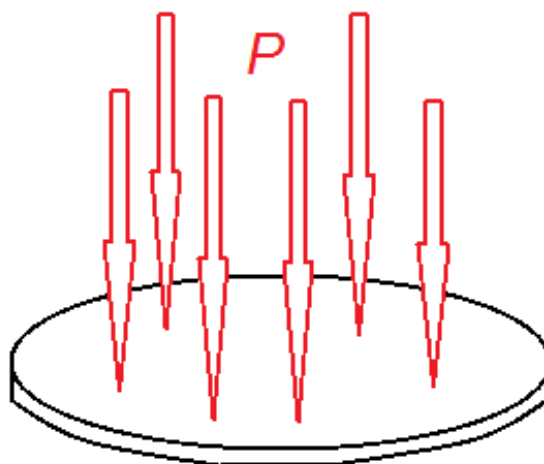


Diagrama de presiones sobre las tapas del depósito

Inicialmente, se considerará que las tapas tienen el mismo espesor que el resto del cilindro, pero al realizar el diseño posterior mediante el método de los elementos finitos en la plataforma Abaqus, si la estructura no resiste, será necesario modificarlo.

2.2 CAÑÓN

El cañón de la estructura propiamente dicho es un tubo de chapa de acero del mismo espesor que el depósito del cañón ($7,25 \times 10^{-3}$ metros) para que resista todos los esfuerzos generados. El cañón tendrá una longitud de aproximadamente 20 metros para que sea lo suficientemente largo como para que se alcance la máxima velocidad del proyectil, además, estará sujeto al suelo con unos soportes que fijarán la estructura en el aire.

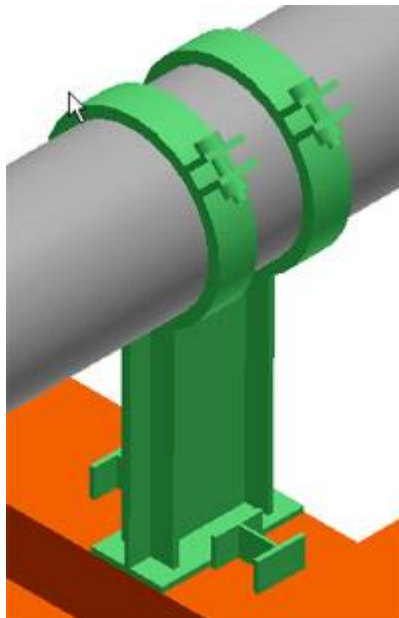


Imagen de los soportes del cañón

Es necesario destacar que el depósito consta de 3 salidas de mismo diámetro (50 centímetros cada una) pero eso no significa que las masas lanzadas sean siempre iguales. Para variar los diámetros hacemos uso de acoples, de los que se hablará con posterioridad. Por tanto, el cañón estará diseñado en función de los metros necesarios para alcanzar la velocidad del proyectil requerida, y se dará un margen lo suficientemente grande por despreciarse distintos rozamientos cuyos cálculos son muy difíciles de estimar.

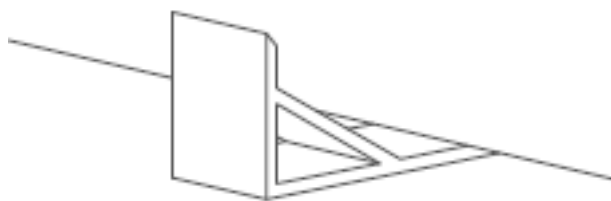
2.3 BANCADA DEL DEPÓSITO

La bancada del depósito debe diseñarse de tal manera que se absorban todos los efectos producidos en el proceso, siendo estos los siguientes:

- Peso del depósito.
- Impactos producidos por el accionamiento neumático.
- Fuerzas debidas a la depresión del aire entre el depósito y el cañón.

De todas las causas la más importante es la debida al peso del depósito. Bien es cierto que, la bancada debe de optimizarse al máximo para no sobredimensionar la estructura, ya que es un proyecto con expectativas reales. Para la realización de la bancada, se partirá de una estructura en forma de triángulo que otorgará gran resistencia. El material usado para la bancada será acero comercial, del mismo material que el depósito, pero de chapa, para que la bancada no alcance un peso excesivo. De esta manera se proporcionará uniformidad y resistencia a la estructura, y la bancada podrá soportar sin problema los esfuerzos.

Dado que la longitud del depósito podría cambiar a lo largo del problema, la profundidad de la bancada no se puede establecer hasta haber terminado el problema. Sin embargo, si se puede diseñar la estructura de la misma, que es como se muestra a continuación.



Bancada del depósito

La bancada del depósito será diseñada con un espesor de 3 centímetros, y una longitud de 1,5 metros, que permitirá al depósito descansar sobre la misma. Además se diseña con un ángulo transversal de 30 grados para otorgar una resistencia mayor.

2.4 ACOPLES

Dado que los diámetros de los agujeros son iguales se hace necesario el uso algún elemento para poder variar el diámetro y así usar diferentes diámetros de cañón con masas diferentes. Para conectar el depósito con el cañón del lanzador neumático de alta energía, es preciso hacer uso de acoples, que pueden ser de diferentes diámetros o no, dependiendo del uso que se quiera dar a las 3 secciones.

Podemos verlo de manera esquemática en la siguiente figura:

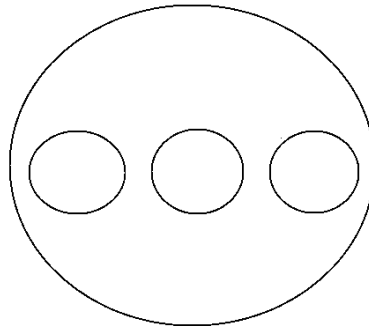


En este caso los acoples son diferentes y permiten que los cañones a conectar tengan diferentes diámetros, pero esto depende de la situación deseada, y la mayoría de las veces los acoples serán los mismos.

2.5 ORIFICIOS DE SALIDA

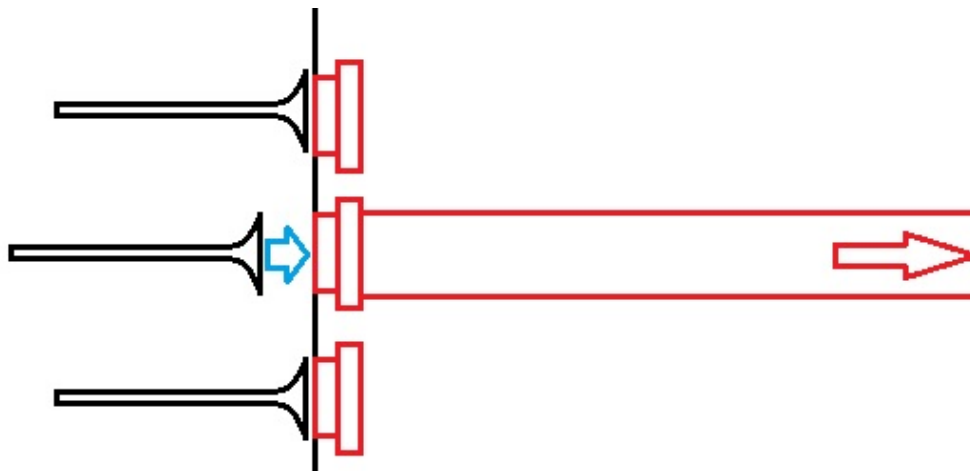
Independientemente de los resultados que se obtengan en apartados posteriores, los orificios de salida son una parte inamovible de la estructura. De todos los componentes de la estructura, los orificios de salida deben de tener siempre el mismo tamaño. Dado que la variación de diámetros se realizará mediante el uso de acoples, todos los orificios de salida tendrán un diámetro de 50 centímetros, es por eso que el radio necesario para el cañón es de 1 metro.

Para entender la situación, podemos ver la siguiente figura:



Vista de los orificios de salida del depósito del lanzador

Se disponen 3 accionamientos neumáticos iguales, conectados al circuito neumático y con las mismas dimensiones en la cabeza cada uno (50 centímetros). De esta manera, si es necesario hacer uso de alguno de los agujeros, se activará ese accionamiento neumático, y el resto permanecerán en reposo, evitando que el aire pase por el resto de los agujeros, y solo atraviese la que corresponde.



Cada uno de los orificios está cubierto por unas juntas que proporcionan estanqueidad al conjunto, y que permiten que el aire no traspase el resto de secciones. Una vez vistos los acoples y los orificios de salida, solo falta por ver la parte neumática.



2.6 ACCIONAMIENTO NEUMÁTICO

Una vez se han determinado las dimensiones de los orificios de salida del depósito (3 orificios de 50 centímetros de diámetro) se puede proceder al diseño del accionamiento neumático de tales dimensiones. Aunque en este pre-diseño no se tratará de manera directa, sí que es lógico establecer una serie de puntos básicos.

Hay que tener en cuenta que los orificios se sitúan de manera horizontal a lo largo de la tapa del depósito, esto quiere decir que la bancada que va unida al accionamiento neumático debe permitir que este se desplace de manera horizontal para poder usar el accionamiento en cualquiera de los tres orificios. También se debe de tener en cuenta el efecto del aire comprimido en el accionamiento, con lo que el componente debe aguantar todas las presiones producidas y el desgaste.

Los actuadores usados para la instalación son cilindros de simple efecto, que solo permiten el recorrido en un sentido, y que vuelvan al estado de reposo al extraer el aire dentro de él.

Además, la presión del circuito neumático debe ser superior a la establecida para que suceda el proceso (5'8 bares) ya que se asumen perdidas en la instalación debido a las conexiones, y a los procesos iniciales de apertura y cierre.

Estas son solo algunas de las consideraciones a tener en cuenta para el diseño del circuito neumático. Dado que se trata de accionamientos simples a una presión relativamente baja, el diseño de la instalación no resulta complicado. Sin embargo, es necesario repetir que el objeto de este proyecto de fin de grado es el estudio de las tensiones debidas al proceso de lanzamiento mediante el uso de elementos finitos.

La parte neumática genera fuerzas adicionales al proceso, es por esa razón, por la que es necesario realizar el diseño de la estructura con un cierto margen.



3 VELOCIDADES

No hay que olvidar, que el objeto principal de este proyecto, es el lanzamiento de proyectiles a alta velocidad para realizar ensayos de impactos. Es razonable por tanto, que la velocidad sea un factor clave.

Para el cálculo de la velocidad se parte de la idea de que cuánto más velocidad sea capaz de adquirir el lanzador, mejor será. Sin embargo, existen un par de restricciones en este campo, ya que la máxima velocidad permitida para el proyectil es la del sonido a 25° ($c = 343 \text{ m/s}$).

Como ya se ha dicho en apartados anteriores, la razón por la cual el proyectil del lanzador neumático se desplaza es la diferencia de presiones aguas arriba y aguas abajo del proyectil. La diferencia entre los volúmenes del depósito y el cañón, así como la diferencia de presiones, hace que esto sea posible.

La gran diferencia de volumen entre las dos secciones hace que se produzca una gran depresión y se libere una fuerza considerable capaz de mover el proyectil. Sin embargo, este proceso no es ideal, y se producen grandes rozamientos que se encargan de frenar el proyectil y reducir la velocidad del proceso. A priori, los rozamientos no parecen muy grandes, pero al final del proyecto se demostrará que supone aproximadamente un 80% de las fuerzas.

Algunos de los rozamientos que intervienen en el proceso son:

- Rozamiento debido al contacto entre el proyectil y la pared del cañón.
- Rozamiento debido a la depresión producida en el proceso.
- Rozamiento debido al aire filtrado entre el proyectil y la pared del cañón.

Es por este motivo que es imposible realizar el cálculo sin tener en cuenta los rozamientos, porque nunca podría alcanzarse tal velocidad. Es por esto que la velocidad nunca puede superar la velocidad del sonido, precisamente porque los rozamientos provocan que esta disminuya de manera brusca. Los rozamientos serán estudiados de manera exhaustiva al final del todo, ya que antes de verlo, debemos conocer las velocidades iniciales.

Una vez conocidas estas y los rozamientos, se realizará el cálculo final para averiguar la velocidad final resultante, y conocer así las velocidades para todos los tipos de diámetros de cañón, que es el objeto del proyecto.



Hay que tener en cuenta también que las presiones a lo largo del cañón varían constantemente, por lo que también lo hacen las fuerzas de rozamiento producidas. Sin embargo, haciendo un estudio previo sencillo, y estudiando las velocidades con las condiciones de diseño ya establecidas de la estructura se podrá comprobar que la velocidad inicial supera con creces a la final, por falta de restricciones.

En lo que sigue, se planteará el cálculo inicial de todas las velocidades, usando todos los pasos requeridos para conseguirlo y, llegando a la conclusión, de que es necesaria la presencia de rozamientos de todo tipo en el proceso para que la velocidad alcanzada sea inferior a la velocidad del sonido.

3.1 ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES INICIALES.

Para llegar a la velocidad final de los proyectiles en función de los diámetros de los cañones acoplados es necesario partir de las velocidades iniciales calculadas con todos los diseños previos de la estructura. Hay que entender que los rozamientos provocan una disminución en la fuerza neta, haciendo así que la velocidad disminuya de manera considerable. Para el estudio de las velocidades iniciales se hará uso de los diseños ya realizados, así como diversos factores que influirán en su cálculo. Algunos de estos factores son:

- La presión interna del depósito.
- Volumen del depósito.
- Volumen del cañón y su longitud.
- Área del orificio de impulsión del proyectil.
- Masa del proyectil.

Teniendo en cuenta todos los factores se pueden calcular de manera sencilla las velocidades iniciales. Primero desarrollando el cálculo teórico, y posteriormente mediante la aplicación práctica para diferentes diámetros del cañón con tablas de Excel.

Dependiendo del diámetro del cañón se podrán lanzar masas de proyectil más grandes o más pequeñas, y las fuerzas generadas serán mayores o menores. En cualquier caso, la manera de proceder será siempre la misma, pero cambiando los valores. A continuación se muestran los cálculos teóricos:



Para el cálculo de las velocidades iniciales, como se ha dicho, se parte de la ausencia de rozamientos, esto quiere decir, que el proyectil sigue una trayectoria con un movimiento uniforme acelerado, debido a las diferencias de presión. Las variables y constantes del problema se muestran a continuación:

Constantes		Variables
<i>Presión deposito</i>	<i>580.000 (Pa)</i>	<i>Masa del proyectil</i>
<i>Longitud cañón</i>	<i>20 (m)</i>	<i>Diámetro del cañón</i>

Partiendo de los datos constantes, y mediante cálculos sencillos, es posible averiguar las velocidades en función de las variables del problema.

Al activarse el accionamiento neumático, el aire comprimido del depósito, recorre aguas abajo el cañón con un diámetro (D). Se puede relacionar entonces la presión del depósito con la dimensión del cañón de la siguiente manera:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi D^2}$$

Por tanto, la fuerza que se produce al liberarse el aire comprimido es la siguiente:

$$F = \frac{\pi D^2 P}{4}$$

Considerando una masa de valor (m), para nuestro proyectil, se calcula aceleración que sufre dicha masa de la siguiente manera:

$$F = m \cdot a \rightarrow a = \frac{F}{m}$$

Para una aceleración (a) es posible calcular también el tiempo que tarda la masa en recorrer el cañón, así como la velocidad adquirida al final de este. Al tratarse de un movimiento uniforme acelerado, podemos utilizar la siguiente expresión que relaciona la posición, con el tiempo y la aceleración

$$X = X_0 + V_0 \cdot t + \frac{1}{2}at^2$$



Considerando como eje de referencias el inicio del cañón se considera que tanto la posición inicial como la velocidad inicial son nulas. Si despejamos el tiempo en la expresión, tenemos que:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot X}{a}}$$

Una vez hemos hallado el tiempo, solo quedaría averiguar la velocidad al final del cañón mediante la siguiente expresión:

$$v = a \cdot t$$

Cabe destacar que con la utilización de la expresión del MRU obtendríamos la velocidad media en el cañón. Una vez realizados los cálculos teóricos es necesario dar valores a nuestro problema para conocer los resultados. En nuestro caso, dispondremos de diferentes masas especialmente seleccionadas para nuestros ensayos, así como unos diámetros de cañón predefinidos, todos con la misma longitud (20 metros).

Masas (Kg)	Diámetros (m)
15	0,6
10	0,5
0,013	0,4
	0,3
	0,1
	0,06

Dando valores a la masa y a los diámetros, se estiman unos valores iniciales, que serán con los que se trabajará hasta estimar los rozamientos. Dichos valores iniciales son:

Diámetro (m)	Área del tubo (m²)	Fuerza (N)	Masa (Kg)
0,60	0,28	163991,14	15,00
0,50	0,20	113882,73	15,00
0,40	0,13	72884,95	15,00
0,30	0,07	40997,78	10,00
0,10	0,01	4555,31	0,13
0,06	0,00	1639,91	0,13



<i>Aceleración (m/s²)</i>	<i>Tiempo (s)</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>
10932,74	0,060	661,29
7592,18	0,073	551,08
4859,00	0,091	440,87
4099,78	0,099	404,96
35040,84	0,034	1183,91
12614,70	0,056	710,35

A simple vista se puede observar, que las velocidades son extremadamente altas, y que sólo pueden tratarse de resultados ficticios, ya que la velocidad nunca podría superar la velocidad del sonido (c).

Por otro lado, se han combinado varios tipos de diámetro con la masa, lo que otorga resultados dispares. Al aumentar el diámetro aumenta la fuerza, y con ella la aceleración. Sin embargo, para mismos diámetros, cuánto menor es la masa del proyectil, menor es la aceleración que se produce, ya que es inversamente proporcional.

En cualquier caso, al aumentar la aceleración, el tiempo es menor, y la aceleración aumenta o disminuye en función de estos dos factores. Esto quiere decir, que cuánto más pequeño sea el diámetro del cañón, y por tanto el Área del mismo, menor será la aceleración, y cuanto menor sea la masa, más aceleración se alcanzará, porque el aire pasará con menos esfuerzo a través del cañón.

Velocidades tan altas no pueden ser posibles. Dado que con estudios reales anteriores, se consiguió con cañones similares una velocidad cercana a 200 m/s, si pusiésemos como límite de una velocidad real hipotética, unos 200 metros por segundo para el primer caso, tendríamos que las pérdidas por rozamientos serían enormes. Vamos a calcularlo.

<i>Velocidad real hipotética (m/s)</i>	<i>Velocidad sin rozamientos (m/s)</i>
200	809,91

$$Pérdidas = 809,91 - 200 = 609,91 \rightarrow \% \text{ Pérdidas} = \frac{609,91}{809,91} \cdot 100 = 75,3 \%$$

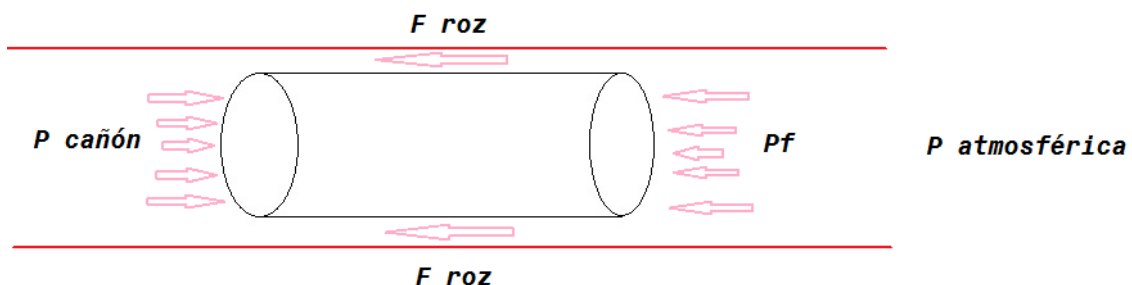
Es decir, las pérdidas aproximadas debidas al rozamiento, son de aproximadamente un 75%, por este motivo, es indispensable averiguar tales fuerzas, y recalcular la velocidad final del proyectil. Una vez calculadas las velocidades iniciales, se procederá al cálculo de los rozamientos, para averiguar así las velocidades finales, que es el objeto de este proyecto de fin de carrera.

3.2 ROZAMIENTOS.

Una vez realizado el análisis de las velocidades iniciales, es necesario conocer todos los rozamientos existentes en el proceso para averiguar las velocidades finales, y así poder compararlas. El punto de partida es conocer todos los rozamientos implicados. Los rozamientos que aparecen al disparar una bala a través del cañón son los siguientes:

- Rozamiento aerodinámico debido a las diferencias de presión aguas arriba y aguas abajo del proceso.
- Rozamiento del cilindro con las paredes del cañón.

Se puede ver de manera detallada mediante el siguiente esquema:



Se puede observar que, aguas abajo del proyectil, existe una presión P_f , que es diferente a la presión atmosférica, y que es la causante del citado rozamiento aerodinámico. Para el cálculo de este rozamiento se trabajará en presiones totales, y por tanto la presión atmosférica no tendrá presencia en los cálculos. De esta manera la presión pasará a ser de 6,8 bares.

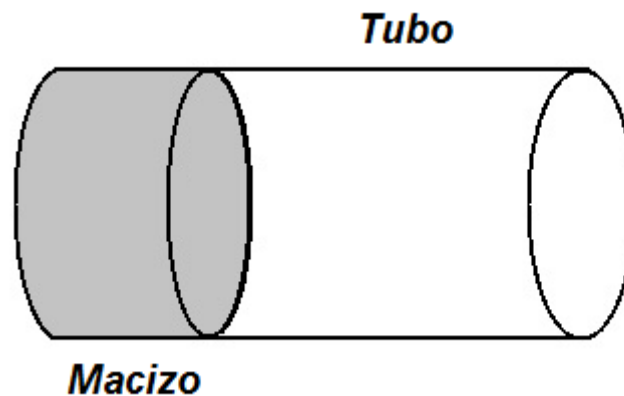
Cada uno los rozamientos se tratará de manera independiente, y teniendo en cuenta todas las consideraciones posibles. Una vez se haya hecho, se realizará una tabla en Excel sumando todos los rozamientos, para hallar la velocidad final del proyectil.

Hay que tener en cuenta, que el cálculo de estos rozamientos es complejo, y en algunos casos es necesario la aplicación de integrales y derivadas parciales sin solución analítica, por lo que será necesario recurrir a métodos alternativos para su resolución.

3.2.1 Rozamiento con la pared

Para entender los rozamientos que se producen entre el proyectil y la pared del cañón, hay que explicar la situación que se produce.

El proyectil de cañón, está aislado en el interior de un cilindro que consta de una parte maciza que es sobre la que se empuja al proyectil, y una parte de aluminio de un grosor despreciable. Esto quiere decir, que la parte causante de este tipo de rozamiento, es la cabeza del cilindro, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Por tanto, el proyectil no tiene contacto directo con la pared del cañón, si no que es el cilindro que contiene el proyectil el que padece dicho contacto. Los rozamientos dependerán por tanto del cabezal del cilindro y su largo, y no del resto del cuerpo. Para que el cilindro se pueda embutir dentro del cañón, es necesario que su diámetro sea prácticamente igual al del cañón.

Las dimensiones a considerar entonces para nuestro sabot son las siguientes:

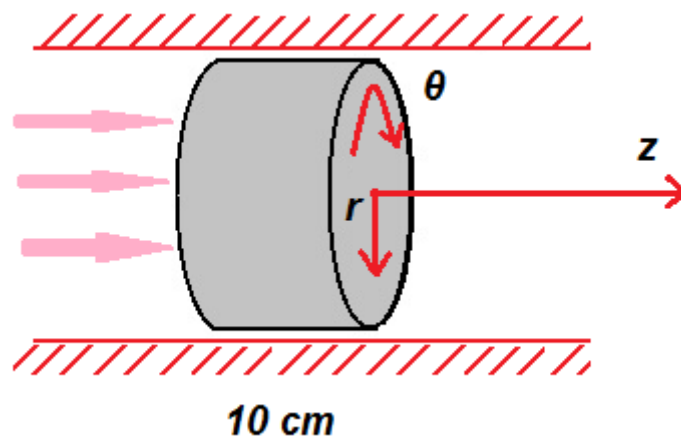
- Sabot de 50 cm de diámetro
- Macizo de 10 cm de longitud
- Tubo de 40 cm de longitud

Una vez obtenidas las dimensiones, se calcula entonces el área del macizo en contacto con la presión del depósito, así como el área del contorno de dicho macizo.

$$A_{\text{macizo}} = \pi \cdot R^2 = 0,19635 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{contacto}} = 2\pi \cdot R \cdot L = 0,15708 \text{ m}^2$$

Una vez halladas las áreas pertinentes, se puede proceder a un estudio más detallado para determinar el rozamiento debido al contacto entre macizo y la pared del cañón.



Para calcular los rozamientos, lo primero es calcular las tensiones que tienen lugar. Dado que estamos trabajando sobre un cilindro, nos vemos obligados a trabajar en coordenadas polares (r, θ, z). Para la resolución del problema, se hace uso de las leyes de Hooke aplicadas a coordenadas polares, que relacionan las deformaciones y las tensiones del elemento en estudio.

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_\theta + \sigma_z)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_r + \sigma_z)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_\theta + \sigma_r)$$

Donde:

- ε son las deformaciones de las direcciones principales.
- σ son las tensiones de las direcciones principales.
- ν es el coeficiente de poisson, generalmente 0,3.
- E es el modulo de young del material en estudio.

De todas las incógnitas del problema son conocidas la tensión en la dirección principal Z, que coincide con la presión del depósito. Además, se sabe que el diámetro del cilindro y el cañón son prácticamente iguales, y que por tanto no se produce ensanchamiento del cilindro, y el desplazamiento en r, es cero.

$$u_r = 0$$

Las deformaciones y desplazamientos en coordenadas polares pueden relacionarse mediante las siguientes fórmulas:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta}$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r}$$

De la primera expresión se deduce por tanto que si $u_r = 0 \rightarrow \varepsilon_r = 0$. Asumiendo la suposición de que este valor de deformación se cumple para todos los puntos a lo largo del eje principal r.

Y como nuestro problema es axil-simétrico, se tiene que:

$$\varepsilon_\theta = 0$$

Por tanto, para la resolución del problema conocemos que las deformaciones tanto en los ejes principales r y teta, tienen valor nulo.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = 0 ;$$

Y por tanto, las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$\sigma_r = \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)$$

$$\sigma_\theta = \nu(\sigma_r + \sigma_z)$$

Despejando la tensión teta de ambas expresiones, e igualándolas, se tiene que:

$$\frac{\sigma_r}{\nu} - \sigma_z = \nu(\sigma_r + \sigma_z)$$

Desarrollando la expresión, y multiplicando el coeficiente de poisson en todos los términos, queda la siguiente ecuación:

$$\sigma_r - \nu(\sigma_r)^2 - \nu(\sigma_z)^2 - \nu\sigma_z = 0$$

Sacando factor común de las tensiones a cada lado y despejándolas, es posible expresar la tensión en la dirección radial en función de la tensión en dirección zeta.

$$\sigma_r(1 - \vartheta^2) = \sigma_z(\vartheta + \vartheta^2);$$

$$\sigma_r = \sigma_z \frac{(\vartheta + \vartheta^2)}{(1 - \vartheta^2)}$$

Dado que se conoce la tensión en la dirección zeta (5,8 bares), y el coeficiente de poisson (que en el caso del aluminio aleado, es de 0,33) podemos calcular la tensión en la dirección r. [8]

La tensión en la dirección, r, es por tanto:

$$\sigma_r = \sigma_z \frac{(0,33 + 0,33^2)}{(1 - 0,33^2)}$$

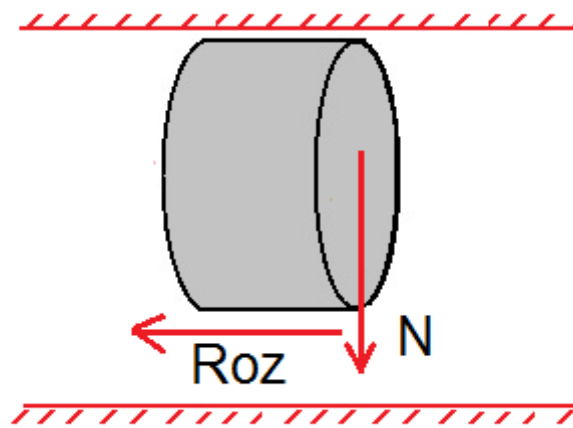
$$\sigma_r = 0,492 \cdot \sigma_z$$

Considerando entonces que la tensión principal en la dirección z tiene un valor a compresión de 5,8 bares, se obtiene el valor de la tensión en la dirección r.

$$\sigma_r = 0,492 \cdot (-5,8 \cdot 10^5) = -0,2854 \text{ MPa}$$

La tensión en la dirección principal r, es entonces a compresión.

Una vez conocido el rozamiento en la dirección x, se calcula la fuerza normal que sufre el macizo de aluminio. Esto quiere decir, que se relaciona la tensión en la dirección r, con la fuerza normal que tiene lugar, como se muestra en la figura.



Por tan, la Fuerza de rozamiento se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$F_{roz} = \mu \cdot N$$



Donde μ es el coeficiente de rozamiento entre el aluminio y el acero, que es el material del que está fabricado el cañón del lanzador neumático. Además, la fuerza normal puede calcularse como:

$$N = \sigma_r \cdot A_{\text{contacto}} = (-0,2854 \cdot 10^6) \cdot 0,15708 = -0,04483 \text{ MN}$$

El signo (-) en la fuerza normal, solo indica la dirección de la misma.

Una vez calculada la fuerza normal, solo falta saber el valor del coeficiente de rozamiento (μ).

Materiales	Coef. de Fricción Estática μ_s	Coef. de Fricción Cinética μ_k
Acero - Acero	0.74	0.57
Aluminio - Acero	0.61	0.47
Cobre - Acero	0.53	0.36
Latón - Acero	0.51	0.44
Cinc - Hierro colado	0.85	0.21
Caucho - Concreto	1.0	0.8
Madera - Madera	0.25-0.5	0.2
Vidrio - Vidrio	0.94	0.4
Cobre - Vidrio	0.68	0.53
Hielo - Hielo	0.1	0.03
Teflón - Teflón	0.04	0.04
Teflón - Acero	0.04	0.04

Tabla de los coeficientes de fricción en función de los materiales [9]

Dado que el coeficiente que queremos es el de fricción cinética, se toma $\mu = 0,47$. Ahora, ya se puede calcular la Fuerza de rozamiento producida entre el cañón y el cilindro de aluminio. Despreciando el signo de la fuerza normal, ya que la fuerza de rozamiento se opone al movimiento, se tiene que:

$$F_{\text{roz}} = \mu \cdot N = 0,47 \cdot 0,04483 \cdot 10^6 = \mathbf{21.070 \text{ N}}$$



Al obtener la fuerza de rozamiento se observa que todos los factores que influyen en su cálculo, como son los coeficientes, no dependen de la velocidad del proyectil, sino del tipo de material. Por esa razón, es fácilmente calculable, al contrario que el rozamiento aerodinámico, que va relacionado con la velocidad, y cuyo cálculo es más complejo.

3.2.2 Rozamiento Aerodinámico

Es el rozamiento debido a las diferencias de presión que se producen aguas arriba y aguas abajo del proyectil. Es preciso diferenciar entre la presión atmosférica, que es la que se sitúa justo al final del cañón, y la presión justo después de proyectil. Para velocidades no superiores a las del sonido, se puede considerar la siguiente fórmula para calcular la presión P_f aguas abajo del proyectil.

Dicha expresión se da en presiones totales.

$$P_f = P_{atm} \cdot \left(1 + \frac{(\gamma_1 - 1) \cdot V_p^2}{2 \cdot a_1^2} \right)^{\frac{2 \cdot \gamma_1}{\gamma_1 - 1}}$$

Donde:

- P_f es la presión aguas abajo del proyectil.
- γ_1 es la relación de calor específico (1,4 en condiciones normales).
- V_p es la velocidad del proyectil.
- a_1 es la velocidad del sonido aguas abajo del proyectil ($343 \frac{m}{s}$).

En el caso del rozamiento aerodinámico, es distinto, ya que la fuerza aerodinámica, depende de la velocidad del proyectil, y no es constante. Es necesario por tanto, el cálculo de una ecuación en función de la velocidad, y que permita su cálculo en cualquier punto del cañón.

Sin embargo, no es necesario calcular la fórmula final para conseguir las velocidades, ya que es posible hacerlo mediante infinitésimos. De esta manera, es posible calcular las velocidades en unos instantes determinados, y saber si el diseño anterior del cañón ha sido correcto o no.

Para empezar el cálculo de las velocidades mediante infinitésimos, hay que tener en cuenta algunas consideraciones. La primera de todas es la fórmula de la cuál vamos a partir. Según la física elemental, existe una relación entre el movimiento de un objeto y la fuerza que se produce sobre él. Esto es la segunda ley de Newton:

$$F = M \cdot a$$

Sin embargo, es preciso relacionar todas las fuerzas en la misma fórmula, ya sean las velocidades, las fuerzas de rozamiento, las presiones, etc. Es posible entonces representar la fórmula anterior de la siguiente manera:

$$M \cdot \frac{dV_p}{dt} = P \cdot A$$

Esto no es otra cosa que hacer uso de derivadas en sustitución a la aceleración, para hacer el estudio correctamente. Sin embargo, eso no es todo, ya que existen numerosas fuerzas que intervienen en el proceso del lanzamiento del proyectil, como las fuerzas de rozamiento. Por ese motivo, es posible dar un paso más y desarrollar la fórmula.

$$M \cdot \frac{dV_p}{dt} = F_{cañón} - F_{aerod} - F_{roz}$$

$$M \cdot \frac{dV_p}{dt} = P_{cañón} \cdot A - P_f \cdot A - F_{roz}$$

El único término que no depende de la velocidad en esta ecuación es la Fuerza de rozamiento, ya que tanto la presión aguas abajo del cañón como la presión aguas arriba varían según el movimiento del proyectil. Queda por tanto una ecuación diferencial no lineal, sin solución algebraica. Una manera de resolver la ecuación, es mediante diferencias finitas. Para ello, se hará uso del método de Euler, explicándolo previamente para un mayor entendimiento. [10]

El método de euler es el más simple de los métodos numéricos, para resolver un problema del tipo:

$$PVI = \begin{cases} \frac{dy}{dx} = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \\ y(x_i) = ? \end{cases}$$

Sin embargo, en el problema del lanzador neumático la única incógnita es la velocidad del proyectil a lo largo de todo el cañón. La condición inicial, sería que la velocidad al inicio del cañón es nula.

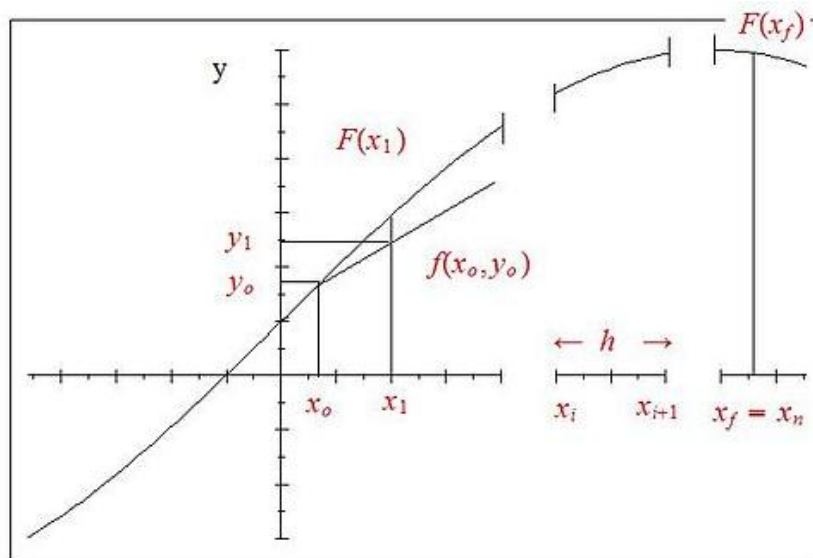
$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = f(v) \\ v(0) = 0 \end{cases}$$

El primer paso para aplicar el método de euler es despejar la ecuación.

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{P_{cañón} \cdot A - P_f \cdot A - F_{roz}}{M}$$

La idea del método de euler es aproximar la ecuación de la recta de la EDO con la ecuación de la recta tangente. Por supuesto se producirán errores. Partiendo de la ecuación de una recta normal, de la cual sabemos los valores iniciales $f(x_0, y_0)$, es posible dividir dicha recta en número determinado de intervalos (n), con una anchura h , hasta llegar desde el punto inicial, hasta el punto deseado (x_n).

De manera gráfica:



Por tanto, se tendría un punto perteneciente a la recta deseada, y otros dos pertenecientes a la recta que se aproxima a la original. La relación de ambas se puede hacer con la pendiente de la recta tangente al punto P_0 .



$$\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = f(x_0, y_0)$$

Despejando la ecuación:

$$y_1 = y_0 + (x_1 - x_0) \cdot f(x_0, y_0)$$

Como se había dicho, se dividen n intervalos de anchura h, y por tanto:

$$h = (x_i - x_{i-1}) \text{ Donde } 1 \leq i \leq n$$

$$h = (x_1 - x_0)$$

Y por tanto queda:

$$y_1 = y_0 + h \cdot f(x_0, y_0)$$

En resumen, se tendría que el valor de la función en el instante i es igual al valor de la función en el instante i-1, más el producto del intervalo h por la función evaluada en el instante i-1. Esto quiere decir, que lo único que se necesita es seleccionar un intervalo h y tener los valores de la función en el instante inicial para poder resolverla. Aplicado al problema del lanzador neumático es bastante sencillo. La función solo depende de la velocidad del proyectil, y por tanto:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = f(v) \\ v(0) = 0 \end{cases}$$

Se divide nuestra función en “n” intervalos con una anchura “h”, que corresponderá a un diferencial de tiempo de 0,001.

Por tanto:

$$h = dt = 0,001 \text{ segundos.}$$

Sin embargo, hay que tener cuidado en un detalle. La función varía con la velocidad, y a lo largo del cañón se produce una caída de presión aguas arriba del proyectil, que produce que las fuerzas sean menores, y que por tanto debe ser tomado en cuenta.



El primer paso es desarrollar la ecuación inicial:

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{P_{cañón} \cdot A - P_f \cdot A - F_{roz}}{M}$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{P_{cañón} \cdot A - \left(P_{atm} \left(1 + \frac{(\gamma_1 - 1) \cdot V_p^2}{2 \cdot a_1^2} \right)^{\frac{2 \cdot \gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \right) \cdot A - F_{roz}}{M}$$

Recordando lo siguiente:

- La P_{atm} tiene un valor de 101.325 Pa.
- La $P_{cañón}$ no se mantiene constante a lo largo del mismo y en el instante inicial tiene un valor de $P_{cañón}(t = 0) = 6,8 \cdot 10^5 Pa$.
- La F_{roz} no depende de la velocidad del proyectil y es $F_{roz} = 21070 N$
- Se trabaja con un intervalo $h = dt = 0,001 seg$.
- A es el área del cañón : $A = 0,196 m^2$
- M es la masa del proyectil = 15 kg.
- γ_1 es la relación de calor específico (1,4 en condiciones normales).
- V_p es la velocidad del proyectil
- a_1 es la velocidad del sonido aguas abajo del proyectil ($343 \frac{m}{s}$).

Ahora sí es posible aplicar el método de Euler con los siguientes pasos:

1. Se parte de un tiempo $t=0$, y se hacen intervalos de anchura $h = dt = 0,001 seg$, además de una presión $P_{cañón}(t = 0) = 6,8 bares$, por estar trabajando con presiones totales.
2. En el instante inicial, se trabaja con una presión inicial de 6.8 bares. Por tanto, todos los datos en el instante inicial, quedarían reflejados de la siguiente manera:

Tiempo(s)	Velocidad(m/s)	Presión(Pa)
0	0	680000

3. Una vez iniciado el recorrido del proyectil, el volumen que deja detrás de sí va aumentando con el espacio recorrido, y por tanto la presión del depósito disminuye poco a poco. Sin embargo, no se puede saber directamente esta presión, por lo que es necesario relacionarla con el volumen creado.

Considerando que en el lanzador se produce un proceso adiabático, esto quiere decir que el intercambio de calor es nulo ($Q=0$), se puede usar la siguiente expresión matemática para un gas:

$$PV^\gamma = \text{constante}.$$

Donde P es la presión del gas, V es el volumen que ocupa dicho gas, y γ es la relación de calores específicos, que como habíamos visto anteriormente, para el aire es 1,4. Primero por tanto, se calcularán los volúmenes creados al moverse el proyectil, y se relacionarán para calcular la presión resultante con la fórmula anterior de la siguiente manera:

$$P_i \cdot V_i^\gamma = P_f \cdot V_f^\gamma$$

Donde i y f representan los estados iniciales y finales del proceso, es decir: aguas arriba y aguas abajo del proyectil. Es decir, en el cálculo del rozamiento se tendrá un volumen inicial, con su consecuente presión, para empezar todos los cálculos, y un volumen final con su respectiva presión para todos los instantes del proceso.

4. Una vez calculados los valores iniciales, es cuando se aplicará el método de Euler. Como se ha comentado con anterioridad, es la manera más sencilla para resolver problemas de este tipo. Se trata de una integración con diferenciales de tiempo pequeños de anchura " h ", como ya hemos visto.

Considerando que los intervalos tienen una anchura de $h = dt = 0,001 \text{ s}$, es posible calcular el diferencial de velocidad de proyectil en cada intervalo, hasta " n " intervalos.

Se tiene por tanto la siguiente fórmula:

$$dV_p = \frac{P_{cañón} \cdot A - \left(P_{atm} \left(1 + \frac{(\gamma_1 - 1) \cdot V_p^2}{2 \cdot a_1} \right)^{\frac{2 \cdot \gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \right) \cdot A - F_{roz}}{M} \cdot dt$$

Recordando que $P_{cañón}$ cambia en cada instante, y que el resto de valores de la ecuación son constantes.

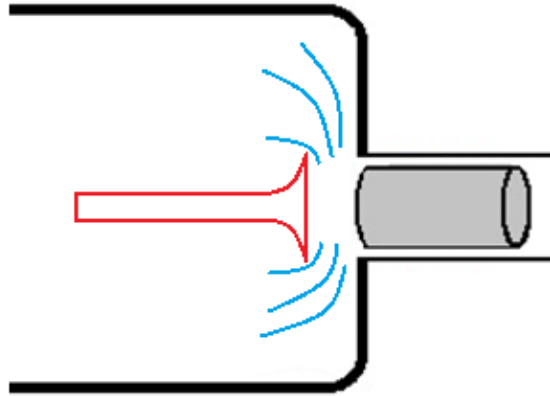
Una vez planteado el método de cálculo, es hora de realizar las cuentas. Como primera aproximación se estimará la velocidad para una presión del cañón constante de 680000 Pascales, de esta manera, se verá el efecto que tiene la disminución de dicha presión en la velocidad del proyectil.

3.2.3 Otros rozamientos

Además de los rozamientos citados anteriormente existe otro rozamiento cuyo cálculo es complicado por el simple hecho de depender de demasiados factores. Este rozamiento es el producido al liberar el accionamiento neumático del orificio del lanzador neumático, y se debe en gran parte a las condiciones de operación del actuador.

El actuador neumático es el encargado de dejar pasar al aire del depósito al cañón del lanzador. Dicho proceso no es ideal y se producen numerables pérdidas. En un estado ligeramente posterior al inicial el actuador se separa del orificio, lo que produce que el aire del depósito quiera acceder a la zona del cañón. Este aire no es suficiente para impulsar el proyectil, y por tanto no puede empezar a moverse. Hasta el momento en el que el actuador no ha terminado su carrera el proceso no se completa.

Es por eso que se producen pérdidas en esta zona, que son muy difíciles de calcular, debido a su complejidad. Para entenderlo mejor, se muestra la siguiente figura:



Para aproximar su cálculo, se podría decir que la presión del depósito es menor a 5,8 bares. Es por eso que el cálculo de otros rozamientos no se realiza, sino que simplemente cuando se calculen las condiciones finales se dejará un margen lo suficientemente grande para cubrir dichas pérdidas.

3.3 ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES FINALES

Como se ha visto, se podría calcular directamente la Fuerza Aerodinámica debida al rozamiento de proyectil con el aire, pero es más factible realizar el cálculo de la velocidad de manera conjunta, ya que dicha fuerza varía con la velocidad del objeto. A continuación se realiza el cálculo de las velocidades finales, tanto teniendo en cuenta constante la presión del depósito, como constante.

$$dV_p = \frac{P_{cañón} \cdot A - \left(P_{atm} \left(1 + \frac{(\gamma_1 - 1) \cdot V_p^2}{2 \cdot a_1^2} \right)^{\frac{2 \cdot \gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \right) \cdot A - F_{roz}}{M} \cdot dt$$

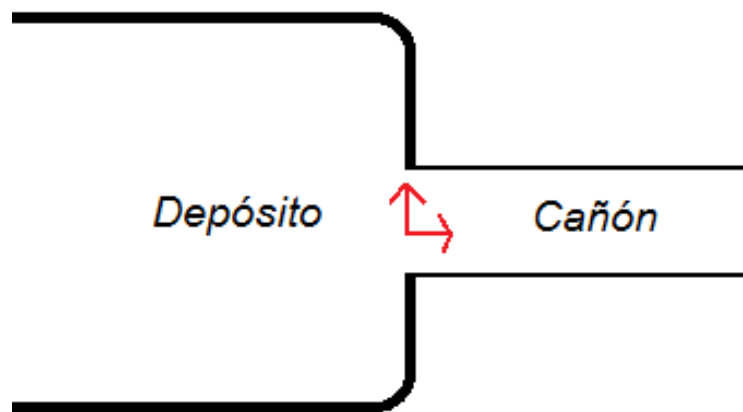
Se calculará cada diferencial de velocidad y de espacio en cada tramo de 0,001 segundos, y se sumará a los anteriores para deducir la velocidad en cada instante del lanzamiento.

3.3.1 A presión del cañón constante

Todos los datos usados para el cálculo se muestran en la siguiente tabla:

<i>Presión del cañón(Pa)</i>	680000
<i>Área del cañón(m²)</i>	0,196349541
<i>Relación de calores específicos (γ_1)</i>	1,4
<i>Velocidad del sonido a 20°C (m/s)</i>	343
<i>Fuerza de rozamiento (N)</i>	21.070
<i>Diferencial de tiempo dt (s)</i>	0,001

Los ejes de referencia para el cálculo estarán situados en la intersección entre el final del depósito y el inicio del cañón, y en el punto del proyectil más cercano al depósito, tal y como se muestra en la figura:



Realizando el cálculo en una hoja de Excel, sumando los diferenciales de velocidades y de tiempo y el espacio recorrido, se obtienen las velocidades a lo largo de nuestro cañón sin dependencia de la presión del cañón.



<i>Tiempo (s)</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>	<i>Distancia (m)</i>
0,000	0,000	0,000
0,001	6,170	0,006
0,002	12,307	0,018
0,003	18,409	0,037
0,004	24,476	0,061
0,005	30,508	0,092
0,006	36,504	0,128
0,007	42,463	0,171
0,008	48,386	0,219
0,009	54,271	0,273
0,010	60,118	0,334
0,011	65,926	0,400
0,012	71,695	0,471
0,013	77,425	0,549
0,014	83,115	0,632
0,015	88,764	0,721
0,016	94,373	0,815
0,017	99,939	0,915
0,018	105,464	1,020
0,019	110,946	1,131
0,020	116,386	1,248
0,021	121,782	1,369
0,022	127,135	1,497
0,023	132,443	1,629
0,024	137,707	1,767
0,025	142,926	1,910
0,026	148,100	2,058
0,027	153,228	2,211
0,028	158,310	2,369
0,029	163,346	2,533
0,030	168,335	2,701
0,031	173,277	2,874
0,032	178,172	3,052
0,033	183,019	3,235
0,034	187,818	3,423
0,035	192,570	3,616
0,036	197,272	3,813
0,037	201,927	4,015
0,038	206,532	4,222
0,039	211,089	4,433
0,040	215,596	4,648
0,041	220,054	4,868
0,042	224,463	5,093
0,043	228,822	5,322
0,044	233,131	5,555
0,045	237,391	5,792



Dando valores inferiores a 343 m/s, ya que como hemos visto a lo largo de todo el proyecto, es la velocidad máxima que puede alcanzarse cuando el fluido de trabajo es aire. La velocidad que se desea conseguir se sitúa cercana a los 150 m/s. Podemos por tanto, extrapolar dichos valores de la tabla anterior.

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)
0,026	148,100	2,058
0,027	153,228	2,211
0,028	158,310	2,369
0,029	163,346	2,533

Según muestra los valores, se puede ver que la velocidad deseada, se alcanza a una distancia del cañón de 2,2 metros. Éste valor es muy inferior al que habíamos establecido para nuestro cañón (20-30 metros). Sin embargo, no hay que olvidar que este cálculo se realiza a presión del cañón constante.

En el caso de la fuerza aerodinámica, se calcula simplemente introduciendo los valores en la fórmula:

$$F_{aerodinámica} = A \cdot \left(P_{atm} \left(1 + \frac{(\gamma_1 - 1) \cdot V_p^2}{2 \cdot a_1^2} \right)^{\frac{2 \cdot \gamma_1}{\gamma_1 - 1}} \right)$$

A una velocidad de proyectil de 150 m/s, la fuerza aerodinámica tiene un valor de:

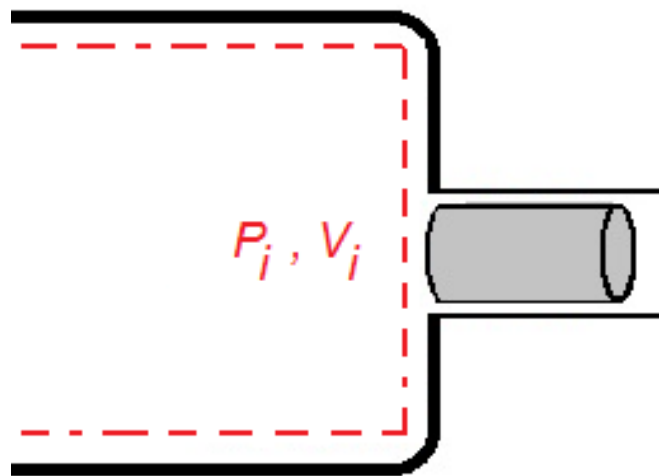
$$F_{aerodinámica} = 35.771,73 \text{ N}$$

Sin embargo, estos cálculos son imprecisos por la variación de los volúmenes. A continuación se realiza el cálculo con presión del cañón variable.

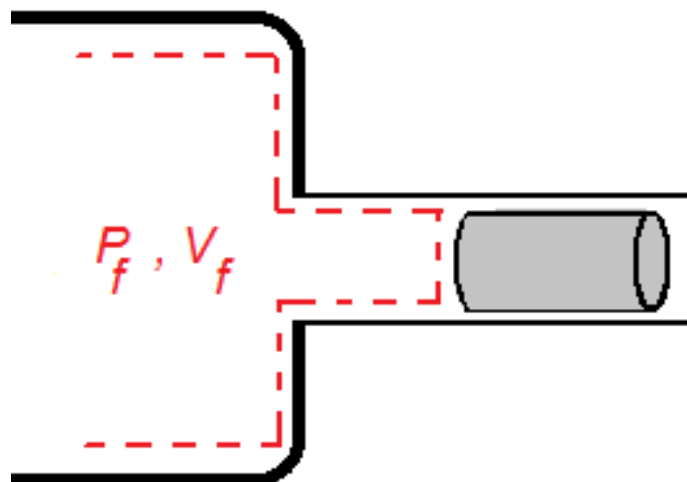
3.3.2 A presión del cañón variable

Cuando el proyectil avanza, deja atrás un volumen, que al juntarse con el del depósito, hace que disminuya la presión del mismo, que inicialmente es de 6,8 bares (presiones totales). El proceso puede considerarse adiabático y puede ser representado en dos fases: el estado inicial (con el proyectil en el estado de reposo), y el estado final (cuando el proyectil tiene una velocidad X en un momento t determinado).

Instante inicial



Instante final





Y la relación que une ambos estados es la que vista anteriormente:

$$P_i \cdot V_i^\gamma = P_f \cdot V_f^\gamma$$

Haciendo uso del teorema de euler y de la hoja de Excel anterior, se recalcula la presión que va dejando el proyectil aguas arriba. Dicho volumen se calcula de la siguiente manera:

$$V_{final} = V_{inicial} + X \cdot A$$

Donde la variable X es el espacio recorrido por el proyectil, y A es el área del cañón. Dicho de otra manera, el volumen final es:

$$V_{final} = V_{inicial} + 0,1963 \cdot X$$

Una vez calculado el Volumen final, se calcula la presión final despejando la expresión de las relaciones de un estado adiabático:

$$\begin{aligned} P_i \cdot V_i^\gamma &= P_f \cdot V_f^\gamma \\ P_f &= P_i \cdot \left(\frac{V_i}{V_f} \right)^\gamma \end{aligned}$$

Y recordando que:

$$V_i = 31,416 \text{ m}^3 ; \gamma = 1,4 ; P_i = 680000 \text{ Pa}$$

Una vez explicado el razonamiento, se procede a introducir los datos en la hoja de Excel, que ahora dispone de más columnas por el simple hecho de ser el volumen variable.



DISEÑO DE UN LANZADOR NEUMÁTICO DE ALTA ENERGÍA

<i>Tiempo</i>	<i>Velocidad</i>	<i>Distancia</i>	<i>Volumen final</i>	<i>Presión aguas arriba</i>
0,000	0,000	0,000	31,4159	680000
0,001	6,170	0,006	31,4171	679963,2892
0,002	12,306	0,018	31,4196	679890,0814
0,003	18,407	0,037	31,4232	679780,6067
0,004	24,471	0,061	31,4280	679635,1106
0,005	30,498	0,092	31,4340	679453,8544
0,006	36,487	0,128	31,4411	679237,1143
0,007	42,437	0,171	31,4495	678985,1815
0,008	48,346	0,219	31,4590	678698,3619
0,009	54,214	0,273	31,4696	678376,9753
0,010	60,040	0,333	31,4814	678021,3556
0,011	65,823	0,399	31,4943	677631,85
0,012	71,562	0,471	31,5084	677208,8188
0,013	77,257	0,548	31,5235	676752,635
0,014	82,905	0,631	31,5398	676263,684
0,015	88,507	0,719	31,5572	675742,3629
0,016	94,061	0,813	31,5757	675189,0801
0,017	99,567	0,913	31,5952	674604,2552
0,018	105,024	1,018	31,6158	673988,3182
0,019	110,432	1,129	31,6375	673341,7092
0,020	115,788	1,244	31,6602	672664,8777
0,021	121,093	1,365	31,6840	671958,2825
0,022	126,346	1,492	31,7088	671222,391
0,023	131,546	1,623	31,7347	670457,6787
0,024	136,693	1,760	31,7615	669664,6287
0,025	141,785	1,902	31,7893	668843,7314
0,026	146,823	2,049	31,8182	667995,4838
0,027	151,805	2,200	31,8480	667120,389
0,028	156,732	2,357	31,8787	666218,956
0,029	161,601	2,519	31,9105	665291,6987
0,030	166,414	2,685	31,9432	664339,136
0,031	171,169	2,856	31,9768	663361,7907
0,032	175,867	3,032	32,0113	662360,1897
0,033	180,505	3,213	32,0467	661334,8627
0,034	185,085	3,398	32,0831	660286,3425
0,035	189,606	3,587	32,1203	659215,1642
0,036	194,067	3,781	32,1584	658121,8644
0,037	198,468	3,980	32,1974	657006,9816
0,038	202,809	4,183	32,2372	655871,0546
0,039	207,089	4,390	32,2779	654714,6233
0,040	211,309	4,601	32,3194	653538,2271
0,041	215,468	4,817	32,3617	652342,4054
0,042	219,565	5,036	32,4048	651127,6966
0,043	223,601	5,260	32,4487	649894,6381
0,044	227,576	5,487	32,4934	648643,7654
0,045	231,489	5,719	32,5388	647375,6122
0,046	235,341	5,954	32,5850	646090,71



De la misma manera, se omiten valores superiores a la velocidad del sonido y se seleccionan aquellos valores cercanos a la velocidad de 150 m/s.

Tiempo	Velocidad	Distancia	Volumen final	Presión aguas arriba
0,026	146,823	2,049	31,8182	667995,4838
0,027	151,805	2,200	31,8480	667120,389
0,028	156,732	2,357	31,8787	666218,956
0,029	161,601	2,519	31,9105	665291,6987

Ahora se puede realizar la comparativa entre las dos situaciones, tanto a presión constante, como a presión variable.

Velocidades a presión constante:

Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Distancia (m)
0,026	148,100	2,058
0,027	153,228	2,211
0,028	158,310	2,369
0,029	163,346	2,533

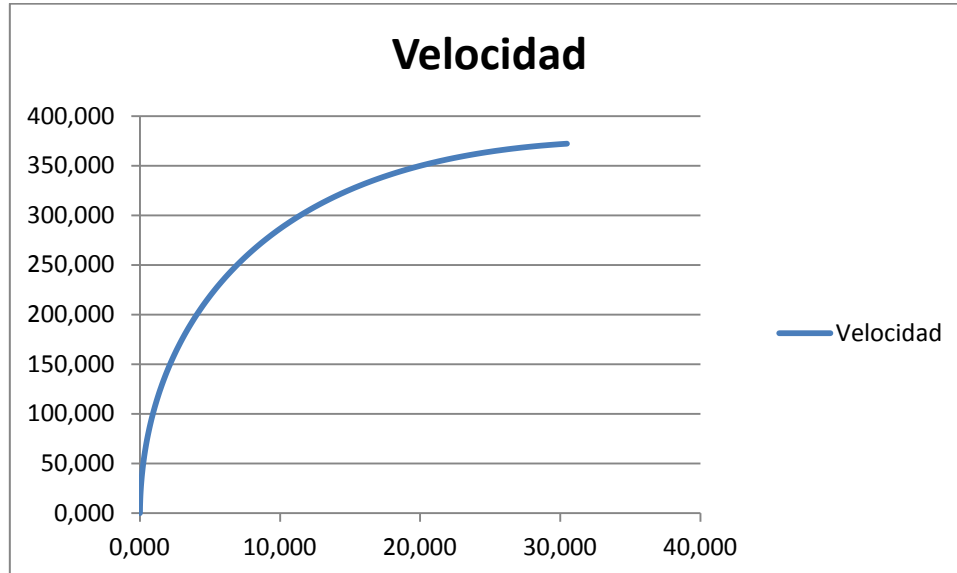
Como se puede observar, la velocidad a presión variable disminuye ya que se produce un aumento de volumen aguas arriba del proyectil. Aunque la diferencia solo sea de orden de uno, es muy importante tenerlo en cuenta.

Una vez obtenidos los datos de las velocidades finales a presión variable, se puede graficar la velocidad con la distancia. A una velocidad de proyectil de 150 m/s, y con presión variable, la fuerza aerodinámica tiene un valor de:

$$F_{aerodinámica} = 35.771,73 \text{ N}$$

3.3.3 Resultados

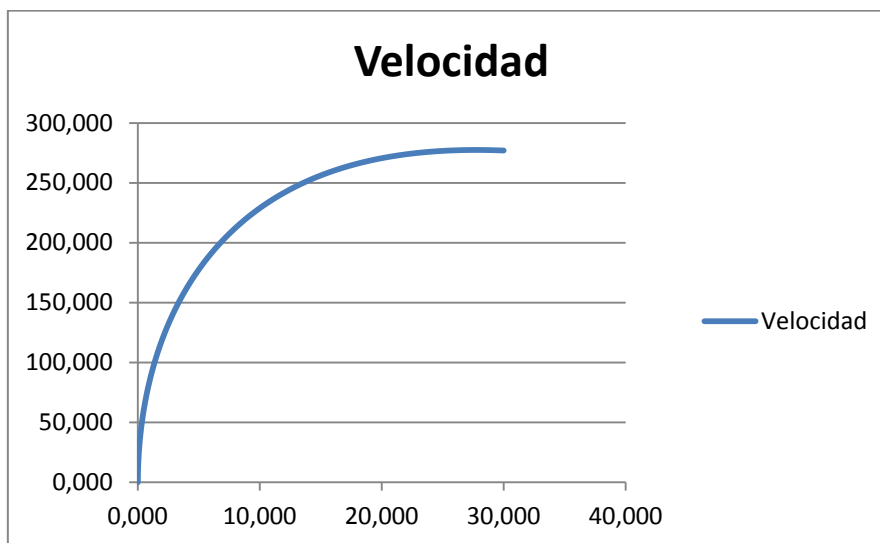
VELOCIDAD VS DISTANCIA CON F.ROZ = 21.070 N



Esta gráfica esta realizada para 30 metros de longitud de cañón. Existe un valor a partir del cual la velocidad no puede aumentar más. En el caso de que la Fuerza de rozamiento tome el valor calculado de 21070 N, esa velocidad sería de 374,8 m/s, pero como la velocidad no puede ser mayor a la del sonido (343 m/s), no se llegaría a la velocidad límite.

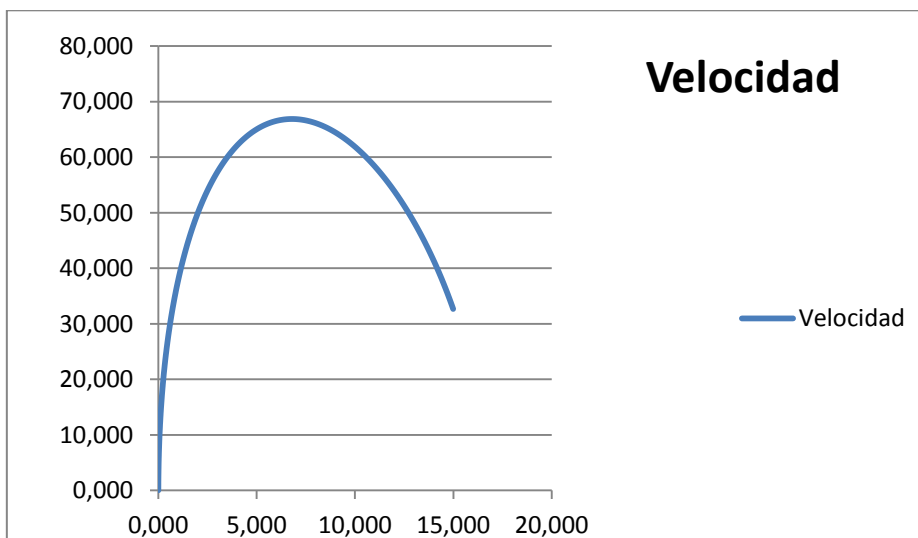
En lo referente a las fuerzas, la fuerza aerodinámica en este caso, tiene el mismo orden de magnitud que la fuerza de rozamiento creada entre el cilindro y las paredes del lanzador neumático. Tanto es así, que podríamos graficar la variación de la velocidad en función valores más altos para la fuerza de rozamiento para ver cuán importante es.

VELOCIDAD VS DISTANCIA CON F.ROZ = 50.000 N



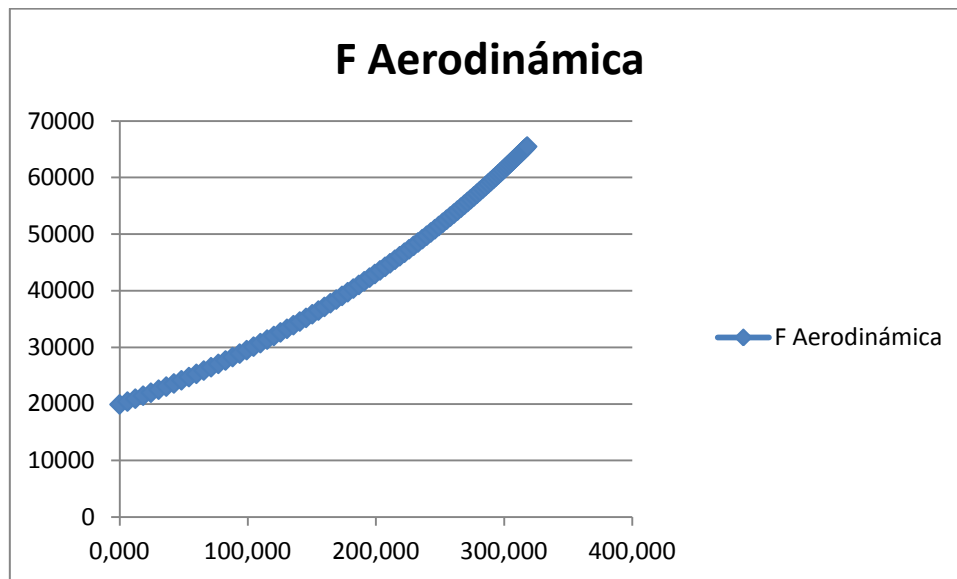
En el caso de que la fuerza de rozamiento fuese de 50.000 N, la velocidad máxima alcanzable llegaría antes de que se acabe el fin del lanzador neumático, a unos 27 metros, y sería de 277 m/s, lo que significa que empezaría a decaer a partir de esta velocidad.

VELOCIDAD VS DISTANCIA CON F.ROZ = 100.000 N



En este caso no es necesario saber que el aumento de la fuerza de rozamiento hasta 100.000 N hace que la velocidad límite se sitúe en un máximo de 67 m/s y tan solo habiendo recorrido 8 metros del cañón.

VELOCIDAD VS FUERZA AERODINÁMICA



Claramente se observa que la fuerza aerodinámica aumenta de manera exponencial con la velocidad. Cuando la fuerza de rozamiento aumenta de manera considerable, podemos observar, que llega un punto crítico, en el que la velocidad baja, obviamente, esto se debe a que disminuye tanto la presión aguas arriba del proyectil, que éste se frena.

Pero para el caso estudiado, con todas las condiciones iniciales de volúmenes y estructuras, el proyectil no frenaría antes de la velocidad del sonido. Frenaría al alcanzarse esta.

Llegados a este punto, se pueden sacar unas cuentas conclusiones:

- De todas las fuerzas que frenan el avance del proyectil, la que más peso tiene es la fuerza de rozamiento del cilindro con las paredes.
- Llega un punto en el que la velocidad no puede aumentar más, (velocidad crítica), y empieza a decaer.
- El proyectil no puede alcanzar más velocidad que la del sonido.

Además de todas estas conclusiones, no hay que olvidar la más importante. El cañón del lanzador neumático ha sido sobredimensionado, y es necesario realizar unos ajustes para volver a comenzar los cálculos y optimizar el diseño.



3.4 OPTIMIZACIÓN

Al inicio del problema se conocían dos cosas, que la velocidad del cañón deseada debería de ser de unos 150 m/s, y que sería imposible que el proyectil alcanzase la velocidad del sonido.

Después de tantos cálculos, se han podido calcular todas las fuerzas de rozamiento y el impacto de las mismas, y ahora podemos recalcular nuestro lanzador neumático para que esté 100% optimizado.

Antes de comenzar la optimización del cañón es necesario saber cuáles son los factores que pueden ser cambiadas y cuáles no. Está claro que todos influyen en mayor o menor medida en la velocidad del proyectil, pero hay algunos que lo hacen con más fuerza que otros.

En cualquier caso, hay datos que no pueden variarse, ya que afectan directamente al propósito de nuestra misión. Algunos son:

- La Fuerza de rozamiento entre el cilindro y las paredes es la misma, ya que se desea lanzar materiales con un alto peso que solo es posible almacenarlos en tales cilindros.
- Los materiales son irremplazables, por su coste, resistencia y fácil adquisición, como es el acero de la estructura y el cilindro de aluminio.
- El diámetro del cañón debe de ser el mismo, es decir de 0,5 metros.

Existen por tanto restricciones para el diseño del cañón. Inicialmente se había visto que es necesaria la construcción de 3 agujeros con el mismo diámetro del cañón para lanzar diferentes materiales y cada uno con su accionamiento neumático. Por tanto, la idea de reducir el diámetro del depósito queda descartada. Por tanto, son dos los factores que pueden modificarse en nuestro lanzador: la longitud del depósito, y la presión en el interior del mismo.

Una solución óptima, sería la de reducir la longitud del depósito a la mitad, y mantener presión del depósito hasta un punto en el que la velocidad máxima del proyectil este cercana a la velocidad del sonido.

Pues bien, esto sucede a una Presión del depósito de 350000 Pascales (presión total). Pero a esta presión, y con una longitud de depósito de 5 metros, los cálculos de tensiones variarían, y la tensión máxima soportada por el depósito sería diferente.

Por tanto, la solución más lógica sería la de mantener la presión del depósito constante, y reducir la longitud del mismo, ya que con esto se conseguirá reducir el



peso de la estructura, así como las dimensiones totales. Reduciendo el volumen interno del depósito a la mitad, se tiene:

Datos de partida:

$\sigma_y (MPa)$	$P_{interna} (Pa)$	$V_{interno\ depósito} (m^3)$	<i>Coef seguridad</i>
240	580000	15	3

Estimación:

$\sigma_{real} (MPa)$	$R_{interno} (m)$	<i>espesor</i> (m)	$L_{deposito} (m)$
8,00E+07	2,5	1,81E-02	0,763943727
8,00E+07	2,25	1,63E-02	0,943140404
8,00E+07	2	1,45E-02	1,193662073
8,00E+07	1,8	1,31E-02	1,47365688
8,00E+07	1,7	1,23E-02	1,652127437
8,00E+07	1,6	1,16E-02	1,865096989
8,00E+07	1,5	1,09E-02	2,122065908
8,00E+07	1,4	1,02E-02	2,436045047
8,00E+07	1,3	9,43E-03	2,825235676
8,00E+07	1,2	8,70E-03	3,315727981
8,00E+07	1,1	7,98E-03	3,945990325
8,00E+07	1	7,25E-03	4,774648293
8,00E+07	0,9	6,53E-03	5,894627522
8,00E+07	0,8	5,80E-03	7,460387957
8,00E+07	0,7	5,08E-03	9,744180189
8,00E+07	0,6	4,35E-03	13,26291192
8,00E+07	0,5	3,63E-03	19,09859317
8,00E+07	0,4	2,90E-03	29,84155183
8,00E+07	2,5	1,81E-02	0,763943727
8,00E+07	2,25	1,63E-02	0,943140404
8,00E+07	2	1,45E-02	1,193662073

Para el caso de diámetro 2 metros para el depósito, se tendría lo siguiente:

$\sigma_{real} (MPa)$	$R_{interno} (m)$	<i>espesor</i> (m)	$L_{deposito} (m)$
80	1	7,25E-03	4,774648293

Sin embargo, esto es en el caso hipotético inicial, en el cuál el espesor de las tapas del cañón era igual al del cilindro del depósito. Hay que recordar que esta suposición es arriesgada, ya que en ningún momento se sabe con exactitud la fuerza sobre las tapas por la complejidad del cálculo.

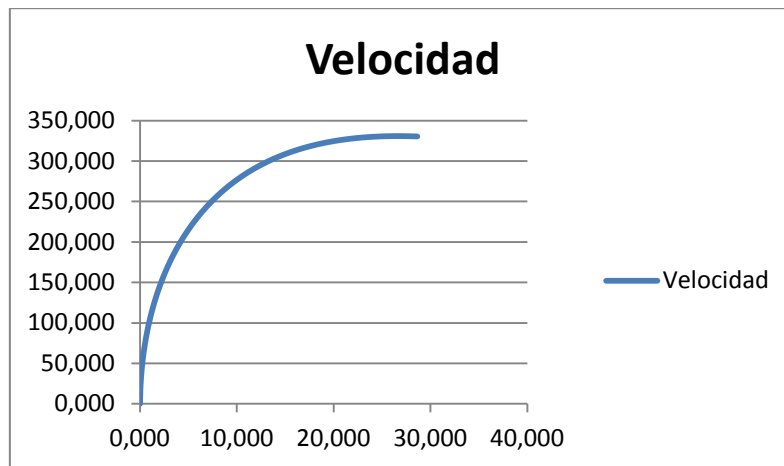
Es por eso que el espesor de las tapas no puede ser calculado hasta diseñar el lanzador en la plataforma Abaqus.

$\sigma_{real}(MPa)$	$R_{interno}(m)$	$espesor(m)$	$L_{deposito}(m)$
80	1	7,25E-03	5

Por tanto, realizando una cuenta rápida, y siguiendo las especificaciones dichas anteriormente, nos queda, que el volumen interno del depósito tienen un valor de:

$V_{int\ dep}(m^3)$
15,7079

Reduciendo el volumen interno a la mitad, el resultado de la velocidad quedaría:



La velocidad límite en este caso sería inferior a la del sonido, de 330 m/s. La velocidad óptima de nuestro lanzador se alcanzaría antes de los 3 metros de cañón.

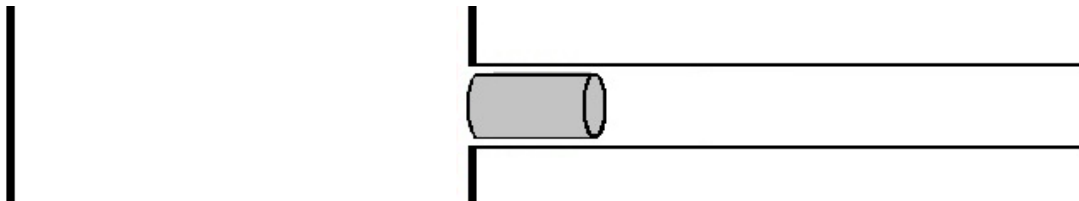
Sin embargo, debido a que pueden existir otras pérdidas, como las indicadas por los actuadores neumáticos y demás, es conveniente dejar el cañón con una longitud de 20 metros, ya que no supone apenas un coste adicional, y podría ser necesario para trabajos futuros.

4 IMPLANTACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

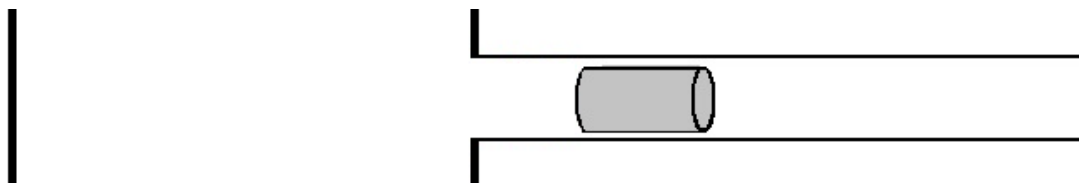
Llegados a este punto del problema, se va a comprobar si la estructura diseñada es capaz de resistir la presión, y por otro lado, el espesor necesario de las tapas para que la tensión de Von Mises no supere el límite elástico del acero con el coeficiente de seguridad que habíamos implantado. Para todo ello, haremos uso de la plataforma ABAQUS, especializada en resolver problemas mediante el método de los elementos finitos, y que ayuda a resolver cálculos complejos como lo serían sobre el papel.

En el proceso de lanzamiento, existen dos estados. El estado inicial o de reposo, en el cuál todos los escapes permanecen cerrados, y la presión del depósito solo se concentra en este, y el estado de lanzamiento, en el cuál el proyectil empieza a avanzar y la presión de depósito va disminuyendo.

Estado de reposo



Estado de lanzamiento



Plantear el estado de lanzamiento en Abaqus es complicado, pues debería de aplicarse el problema teórico de la disminución de la presión a lo largo del cañón.



En el momento de la apertura de una de las secciones del depósito, el cañón del lanzador estaría sometido durante un instante a una presión de 5,8 bares, que disminuiría con el avance del proyectil. Dado que la presión es una función que depende del área, la fuerza sería proporcional a la misma, y obviamente, la fuerza ejercida en el cañón sería menor que la ejercida en el depósito. Además, el uso de acoples para la unión del depósito y el cañón, genera en la unión una rigidez mayor, así como un mejor aislamiento.

Por tanto, dado que la presión va decayendo en el estado de lanzamiento, y que se asume total rigidez del problema, se considera como estado limitante, el estado de reposo, y será por tanto con el que se trabajará de aquí en adelante.

Sin embargo, se crearan todas las partes, incluyendo la tapa con la salida y el cañón, para el cálculo de la masa final. A continuación se muestra la implantación del problema en Abaqus, haciendo hincapié en todos los módulos y mostrando el resultado final de la estructura.

4.1 MÓDULO PART

El primer paso es crear todas las partes del lanzador neumático, incluido el cañón, para luego poder ensayar las partes por separado. Lo primero de todo será diseñar el depósito, con las diferentes sub-partes.

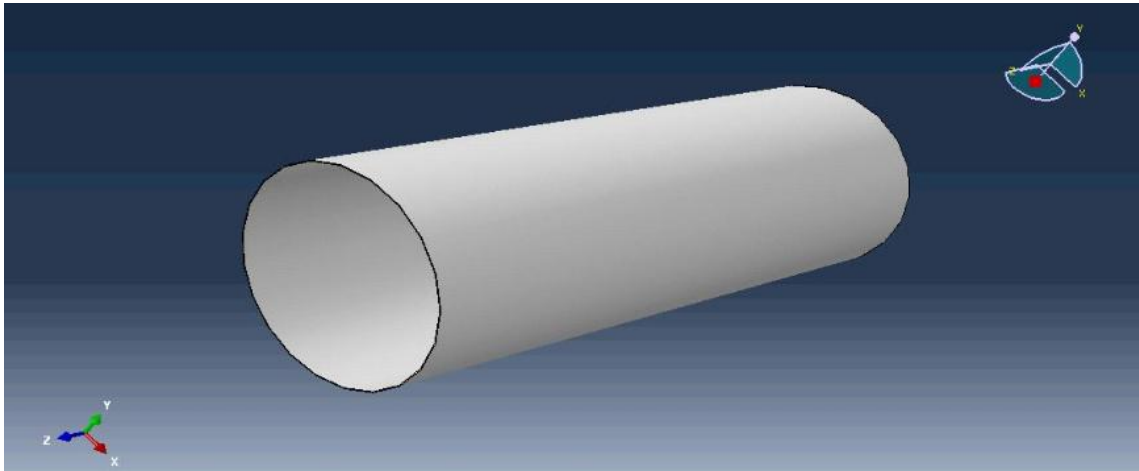
Todas las partes serán tratadas en 3D, y la mayoría de ellas como elementos tipo sólidos y extrusionados.

Las partes para el desarrollo de nuestro problema son las siguientes:

- Tapa 1: Tipo Shell (Planar)
- Tapa 2: Tipo Shell (Planar)
- Bancadas: Tipo Solid (Extrusion)
- Cilindro depósito: Tipo Solid (Extrusion)
- Cañón : Tipo Solid (Extrusion) (No será incluido en ABAQUS)
- Acoples: Tipo Solid (Extrusion) (Aunque por simplicidad se omite en el diseño)

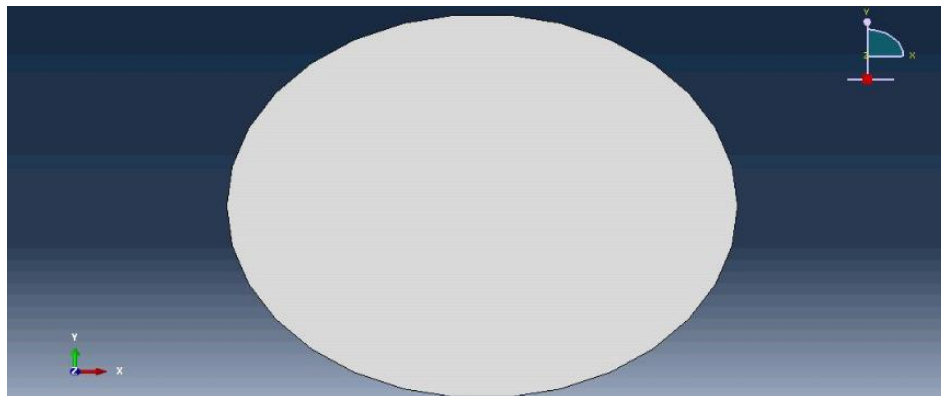
En la zona del plano del Abaqus, se diseñan todas las partes, y se duplican si es necesario.

Depósito



$$D_{\text{interno}} = 2 \text{ metros}; D_{\text{externo}} = 2,015 \text{ metros}; L = 5 \text{ metros}$$

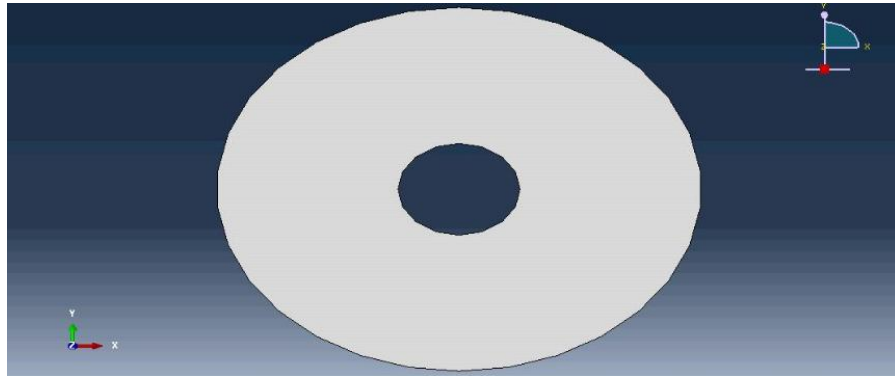
Tapas 1 y 2



$$D = 2,015 \text{ metros}; e = 0,075 \text{ metros}$$

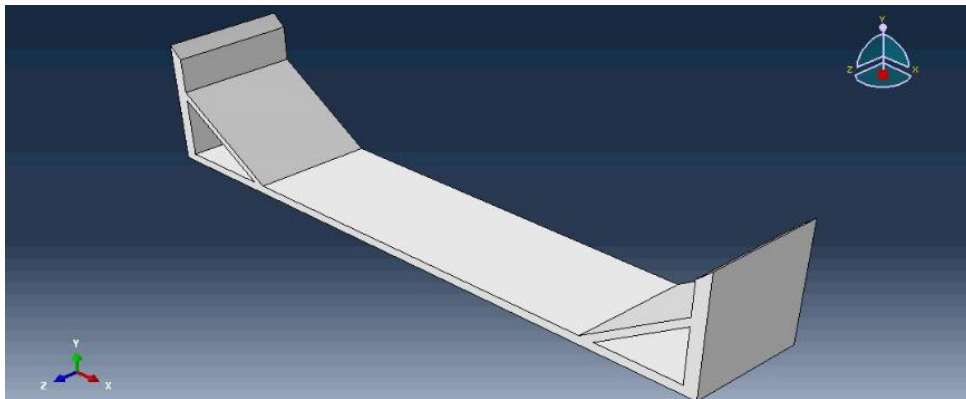
En el caso de que se quisiese realizar el diseño del estado de lanzamiento, la tapa número 2, que sería la de unión con el cañón, debería de tener 3 agujeros de 50 centímetros de diámetro interno cada uno para poder acoplar el cañón.

Tapa 2 (no necesaria en el ensayo)



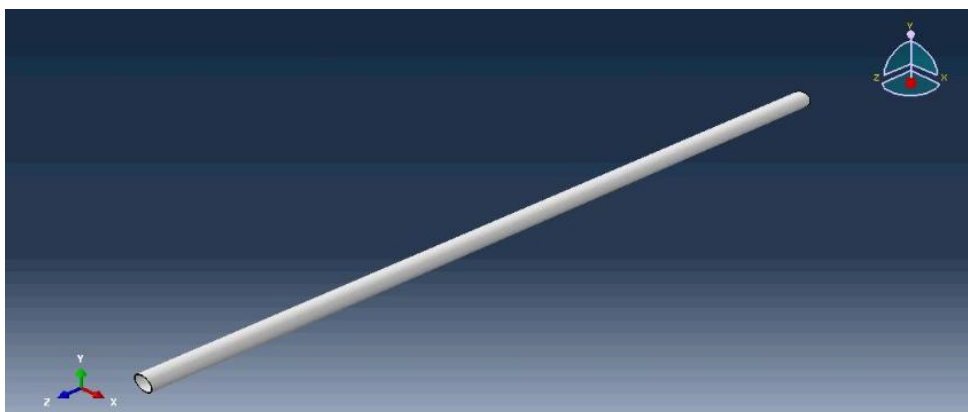
$D_{\text{interno}} = 0,5 \text{ metros}$; $D_{\text{externo}} = 2,015 \text{ metros}$; $e = 0,075 \text{ metros}$

Bancadas



(Dimensiones en planos)

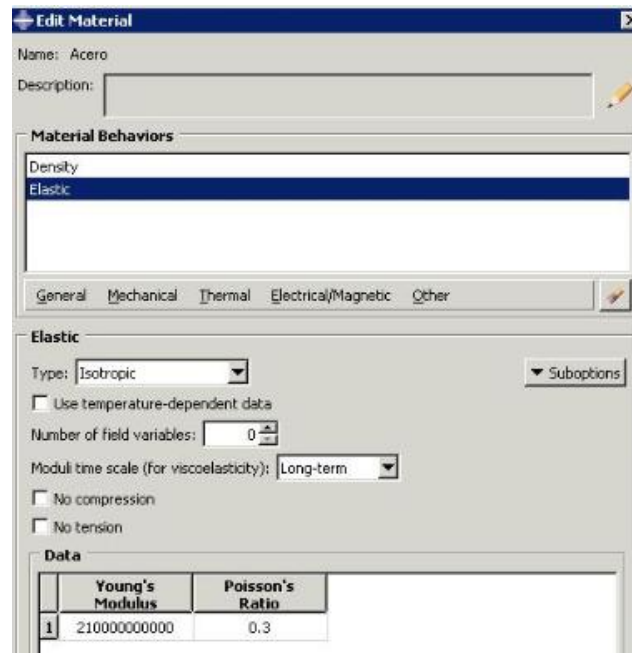
Cañón (No necesario en el ensayo)



$D_{\text{interno}} = 0,5 \text{ metros}$; $D_{\text{externo}} = 0,515 \text{ metros}$; $L = 20 \text{ metros}$

4.2 MÓDULO PROPERTY

Una vez definidas las partes y sus dimensiones, toca crear todas las secciones y materiales para asignarlas a las diferentes partes. El material usado será acero comercial S275 JR, así que será definido con todas sus características.

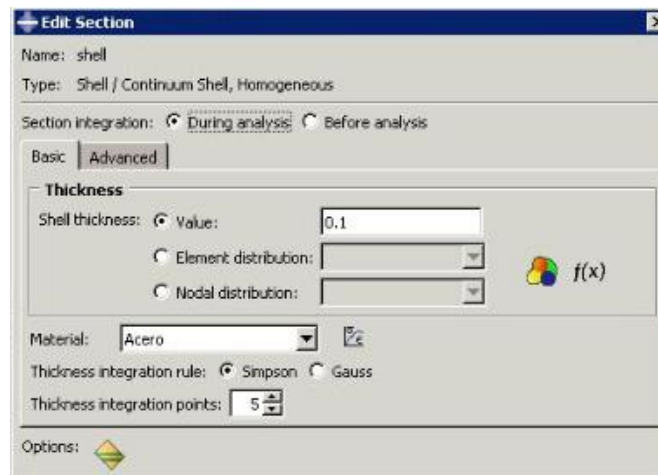


Una vez creado el material, se necesitarán dos secciones, la sección que se aplicará a los elementos tipo sólido, y la que se aplicará a los elementos tipo placa .

4.2.1 Secciones

Sección 1: Será la aplicada a los elementos tipo sólido del problema. Entre ellos se incluyen: el cilindro del depósito, las bancadas, el cañón y los acoples. A dicha sección se le aplicará el material acero, creado con anterioridad

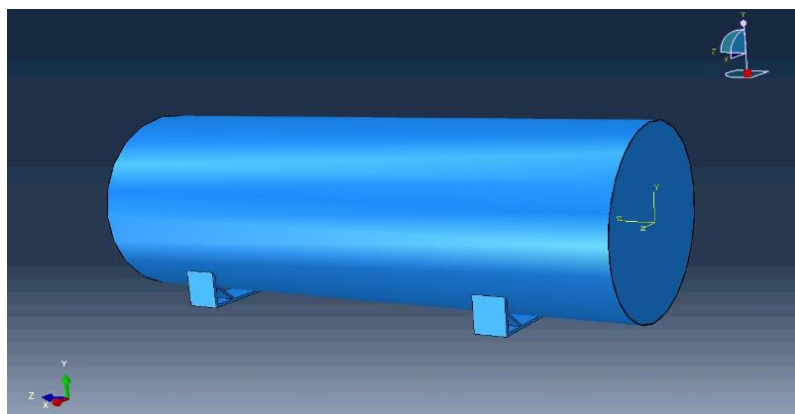
Sección 2 : Es la sección tipo Shell que asignará a la tapa 1 y a la tapa 2. Se muestra a continuación:



Para esta sección se escoge un espesor para las tapas de 0,1 metros que es un espesor muy superior al establecido por el depósito (0,0075 metros). Previamente se han seleccionado espesores inferiores y superiores, y se ha optimizado el espesor de las tapas para ajustar lo máximo posible la máxima tensión.

4.3 MÓDULO ASSEMBLY

En este módulo se unen todas las partes y se convierten en independientes, para luego realizar el mallado de cada parte por separado y que así sea más exacto. Se podrían realizar dos ensamblajes diferentes, uno para cada estado (reposo y lanzamiento), pero dado que el estado de interés es el de reposo, el segundo será omitido. Además, no se incluirá ni el cañón ni los acoples.



4.4 MÓDULO INTERACTION

Aunque en el módulo property se haya hecho coincidir todas las partes del cañón para que fuese construido, estas siguen estando sin unir. Es por eso que se hace necesario el uso de uniones. Gracias a las uniones, se pueden conexas las tapas y las bancadas con el depósito, para formar el lanzador neumático

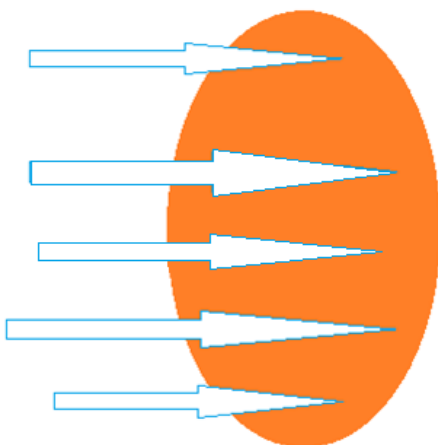
Tanto para el caso de reposo como para el caso de lanzamiento, las uniones serían las mismas, exceptuando el cañón, que solo se encuentra presente en el segundo estado. Las uniones se realizan marcando dos superficies, la superficie esclava y la maestra, y gracias a Abaqus, estas coinciden a la perfección y se consigue una unión sólida.

4.5 MÓDULO LOAD

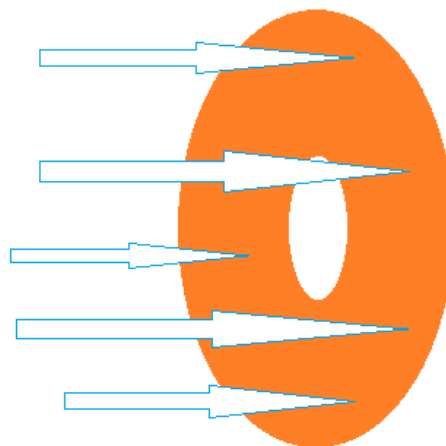
En este módulo se trabaja una de las partes más importantes del proyecto, como son las cargas aplicadas y las condiciones de contorno.

En lo referente a las cargas aplicadas, se aplicarían de la misma manera en el estado de reposo, tanto como en el estado de lanzamiento, exceptuando que en el segundo, la presión aplicada sobre la tapa 2 será solo sobre el anillo. Para entenderlo con claridad, a continuación se muestran unos esquemas:

Presión sobre la Tapa 2 en reposo



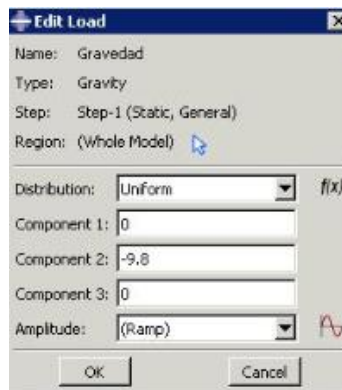
Presión sobre la Tapa 2 en lanzamiento



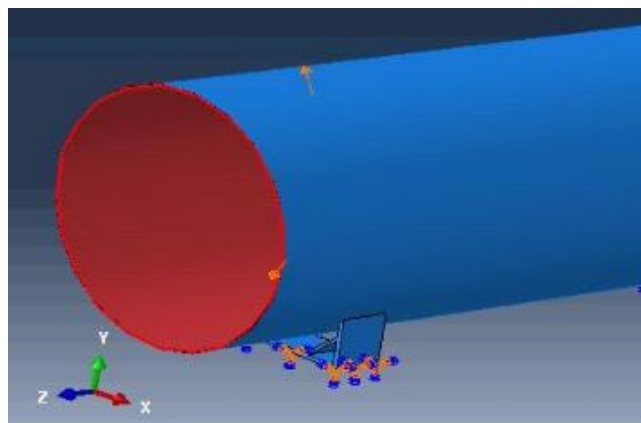
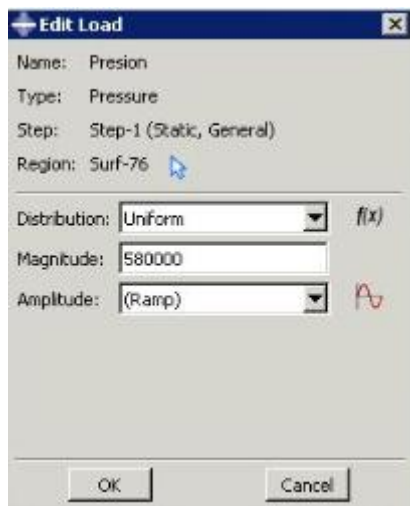
4.5.1 Cargas.

Las cargas presentes en el problema son:

Gravedad: De valor 9,8 en el Sistema internacional, y definida de manera negativa por ser contrario al eje Y

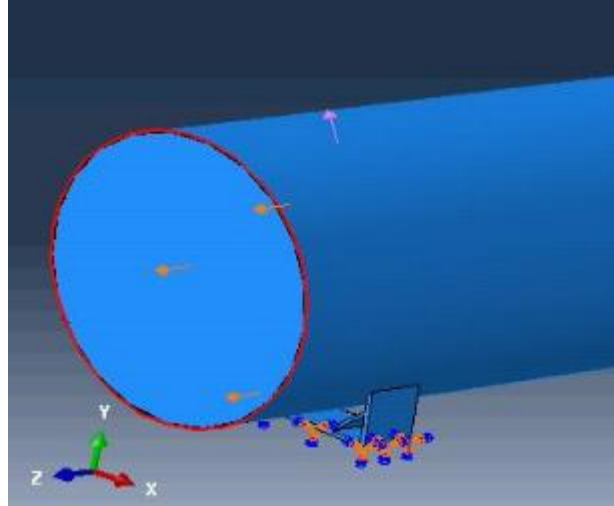
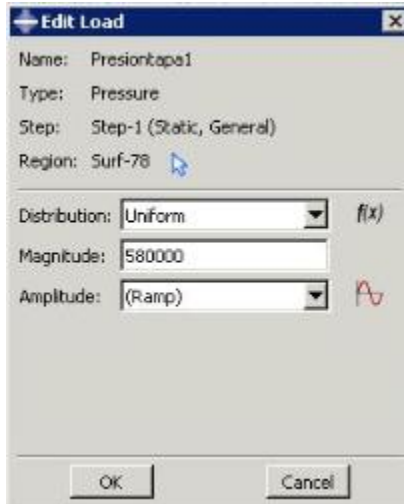


Presión en el cilindro: La presión del depósito es de 5,8 bares, y se aplica tanto a todo el depósito, tanto el cilindro como las tapas. En el caso del cilindro se define de la siguiente manera:



Aplicada en toda la zona interior del cilindro, representado por la superficie roja del dibujo. En sistema internacional, toma un valor de 580000 Pascales.

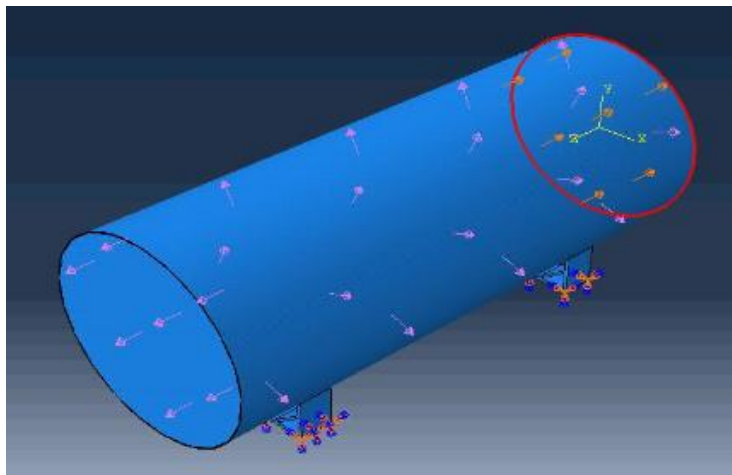
Presión en la Tapa 1: La presión en las tapas adquiere el mismo valor, ya que es la presión interna del depósito. También es aplicada a las tapas porque no se puede aplicar de golpe a todo el depósito.



Aplicada en dirección Z, y con un valor en sistema internacional de 580000 Pascales.

Presión en la Tapa 2: Del mismo valor pero dirección opuesta a la presión en la Tapa 1. En el caso de que existiese cañón acoplado, la distribución de la presión se haría como la de la figura mostrada anteriormente, solo a la zona del anillo.

A continuación se muestra como sería la aplicación de la presión con el cañón acoplado.

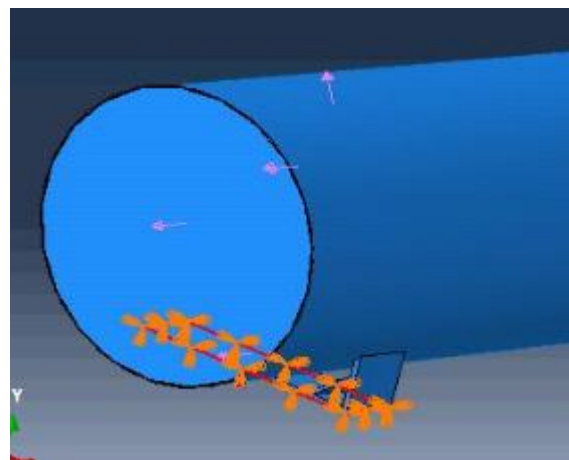


Aplicada en dirección - Z, y con un valor en sistema internacional de 580000 Pascales,

4.5.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno permiten asignar al diseño en Abaqus una serie de condiciones que deben de cumplirse. El depósito está soportado por unas bancadas, y estas están ancladas al suelo de manera FIJA. Es por eso que se usan unas condiciones de contorno tipo ENCASTRED, que impide cualquier movimiento de la parte inferior de las bancadas (la superficie pegada al suelo).

A continuación se muestra:



Aunque solo se muestre la condición de contorno para una bancada, es el mismo caso para ambas.

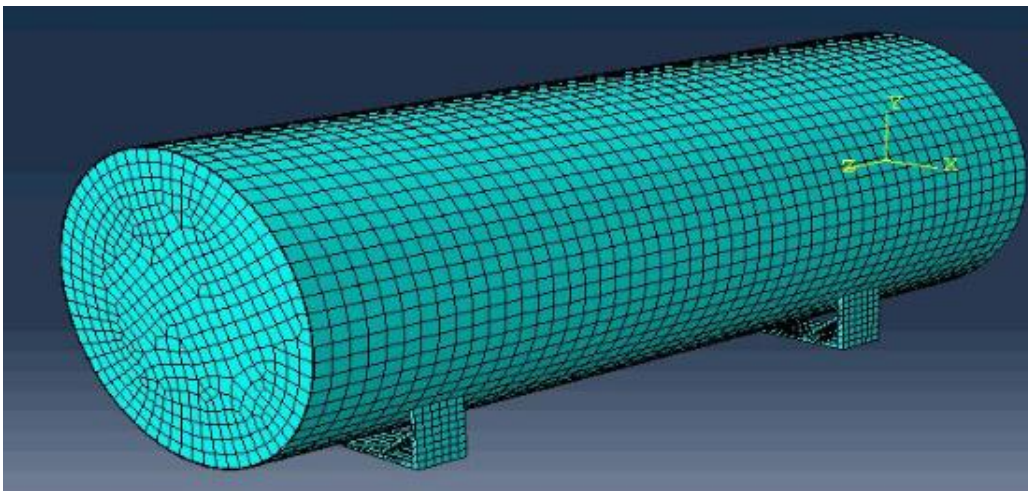
4.6 MÓDULO MESH

Al haberse realizado el ensamblaje de todas las partes del lanzador y establecido cada parte como independiente, el mallado de la estructura se realiza con precisión. Aunque no se usa para el cálculo, se mostrará el mallado de los dos estados, para tener una visión general del problema.

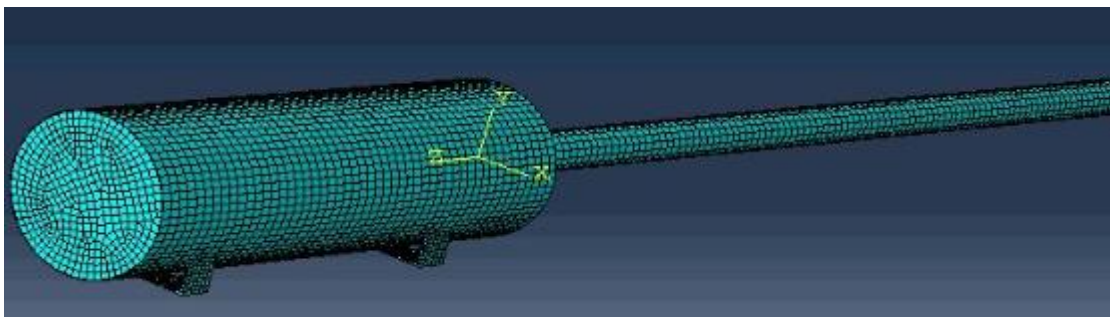
Dado que el Abaqus usado para realizar este proyecto corresponde con la versión profesional, es posible calcular estructuras con más de 1000 nodos. Por tanto, la malla generada, puede ser mucho más precisa.

Sin embargo, no conviene sobrecargar el problema de nodos de manera inútil. Es por eso que se realiza un mallado continuo, pero no excesivo a toda la estructura. De esta manera se consigue uniformidad en los resultados y ligereza en el problema a la hora de ejecutar la estructura. Asignando diferente número de nodos cada X distancia, se puede controlar el tamaño de mallado. Dado que no es un proceso muy importante, y solo interesa el resultado final, solo se va a mostrar el mallado final de cada proceso.

Mallado en el estado de reposo



Mallado en el estado de lanzamiento



Una vez mallado el lanzador, solo falta crear el trabajo, y correr el caso, por tanto el módulo Job se omite por carecer de explicación detallada.

4.7 MÓDULO VISUALIZATION

Una vez generado el mallado, se procede a la creación del trabajo. Es tiempo de correr el caso y ponerlo a prueba. En el módulo visualización se pueden ver todos los resultados, cogiendo especial importancia los desplazamientos y las tensiones de Von Mises. Además, es posible comprobar aspectos importantes del lanzador, como la masa. Recordando que solo se verá el estado de reposo, por considerarse el estado limitante del problema.

TENSIÓN DE V.MISES

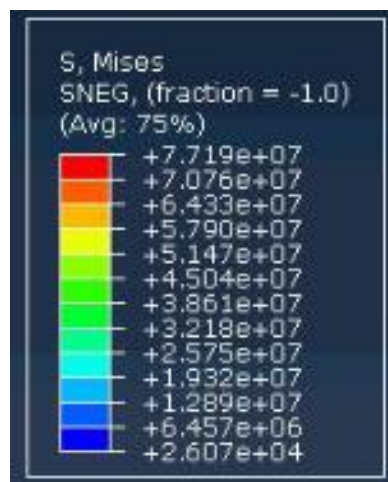
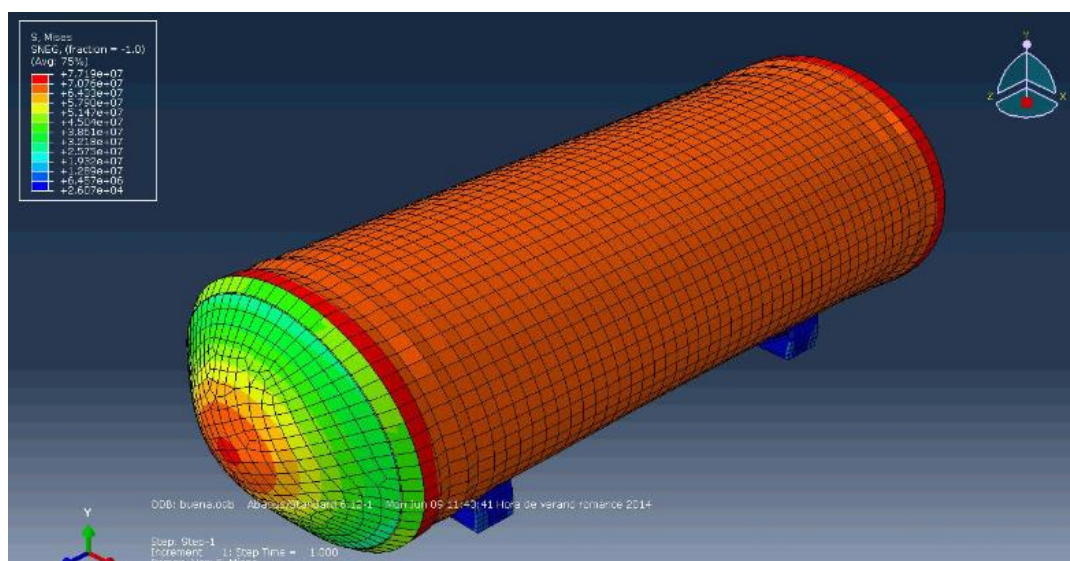


DIAGRAMA DE LAS TENSIONES DE VON MISES



Antes de evaluar los resultados, hay que recordar que se ha ensayado el lanzador con un espesor de las tapas de 0,1 metros. La tensión máxima obtenida de Von Mises se produce tanto en el centro como en la zona del depósito más próxima a las tapas, y toma un valor de $7,719 \times 10^7$ Pascales, lo que significa que la tensión máxima admisible es de 77 Mpa.

Es fácil ver, que el diseño está muy optimizado, porque de no ser así podrían pasar dos cosas:

- Si el espesor de las tapas fuese menor, la tensión máxima superaría la admisible establecida, y la estructura rompería.
- Si el espesor de las tapas fuese mayor, la tensión máxima no se produciría en el centro de la misma, si no en el depósito, y por tanto la estructura estaría sobredimensionada.

Volviendo hacia atrás, se puede recordar que la tensión máxima establecida para el lanzador con un coeficiente de seguridad de 3, es de 80 Mpa.

$$\sigma_{V.Mises} \approx 77 \text{ Mpa} < \sigma_{max} = 80 \text{ Mpa}$$

Por tanto, el campo de tensiones es correcto, y la estructura cumple con los requisitos.

CAMPO DE DESPLAZAMIENTOS

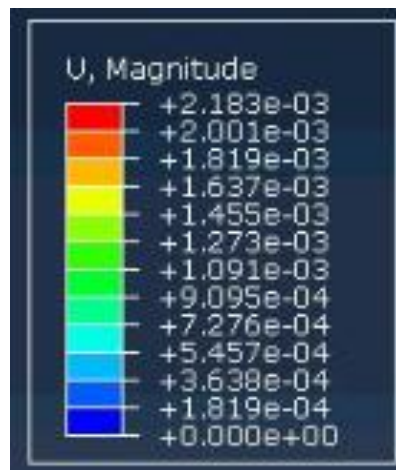
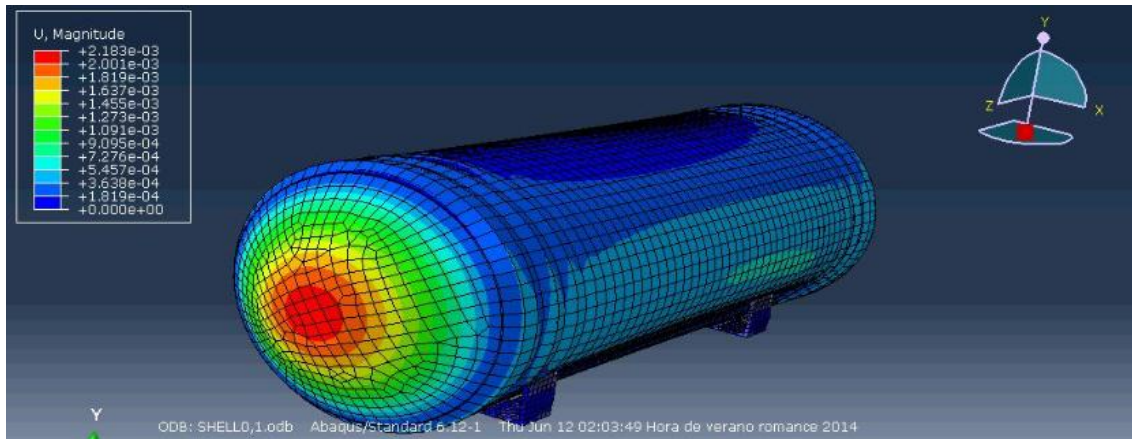


DIAGRAMA DE DESPLAZAMIENTOS



Según el diagrama de campos de desplazamientos, se observa que el mayor desplazamiento tiene un valor de $2,183 \times 10^{-3}$ metros, que es un desplazamiento muy pequeño. Además, como es lógico, coincide con la máxima tensión de Von Mises en las tapas, es decir en el centro. Aunque en la zona del depósito más próxima a la tapa también existe tensión máxima, no se produce deformación máxima porque existe una unión entre los dos elementos.

Por tanto, se puede decir que 2 milímetros es una cifra más que asumible para el desplazamiento máximo, y se da por válido el diseño. Sin embargo, no solo hay que evaluar las tensiones y los desplazamientos de la estructura. Un dato importante a tener en cuenta, es la masa del lanzador. Aunque inicialmente, se calculó con una masa aproximada de 4000 Kg, la variación del espesor de las tapas ha provocado que la masa cambie de manera importante.

Además, también hay que tener en cuenta el diseño de las bancadas. En lo referente a las bancadas, se ha establecido una profundidad de 0,3 metros, que influye en el peso total de la estructura, pero que otorga resistencia al lanzador evitando que este se mueva. A partir de menos de 0,1 metros de profundidad para las bancadas, el desplazamiento máximo de la estructura se produce en las mismas, ya que no es capaz de soportar el peso del depósito y se doblan.

Antes de proceder a las dimensiones finales de la estructura, se verá el peso individual de cada componente, y el general de toda la estructura para ver el impacto de cada parte.



Componente	Cantidad	Peso individual (Kg)	Peso total (Kg)
<i>Cilindro depósito</i>	1	1844,72	1844,72
<i>Tapa 1</i>	1	2487,34	2487,34
<i>Tapa 2</i>	1	2329,56	2329,56
<i>Bancada</i>	2	198,31	396,62
<i>Cañón</i>	1	1865,40	1865,40

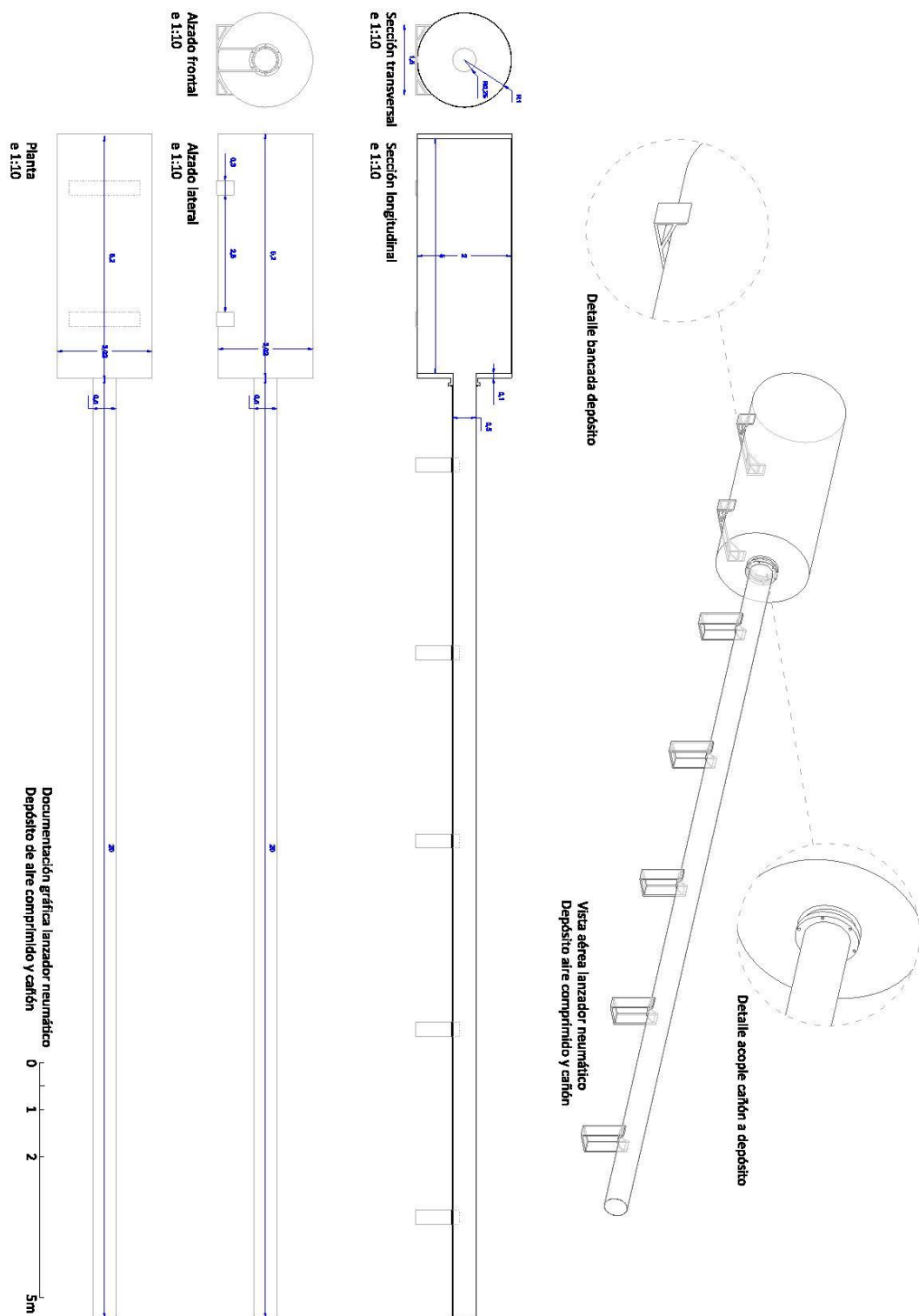
Omitiendo el peso del acople, el peso final de la estructura es: **8923,64 kg**

Aunque se trate de un peso elevado, hay que recordar que se trata de un lanzador neumático de grandes dimensiones construido con acero, que posee una gran densidad pero otorga gran resistencia. Por otra parte hay que destacar el peso elevado de las tapas del depósito. Inicialmente, con un espesor de apenas 1 milímetro, el peso era muy reducido, pero no conseguía resistir la presión. Aunque sea un peso excesivo, es necesario, ya que como se dijo al principio del proyecto, las tapas del depósito están sometidos a procesos de tensiones complicados de estudiar.

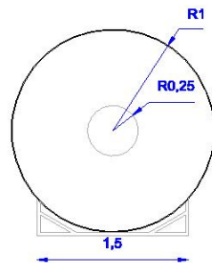
Ahora que todas las dimensiones del lanzador han sido determinadas, se hará un plano de conjunto mediante la herramienta Autocad, con las bancadas del cañón incluidas, para otorgar una visión general del proyecto.

5 DIMENSIONES FINALES EN PLANOS Y DETALLES.

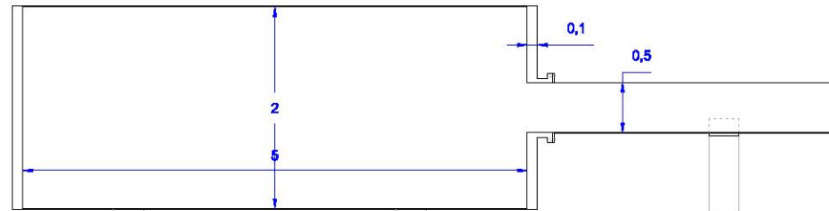
5.1 PLANO DE CONJUNTO



5.2 SECCIONES

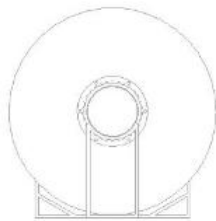


Sección transversal
e 1:10

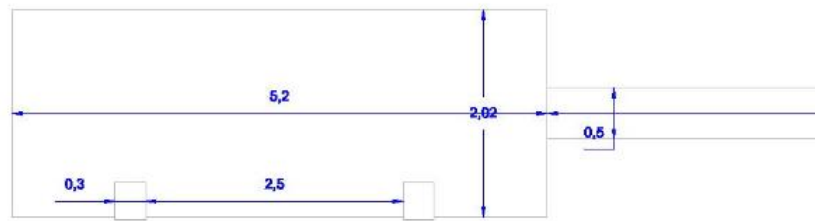


Sección longitudinal
e 1:10

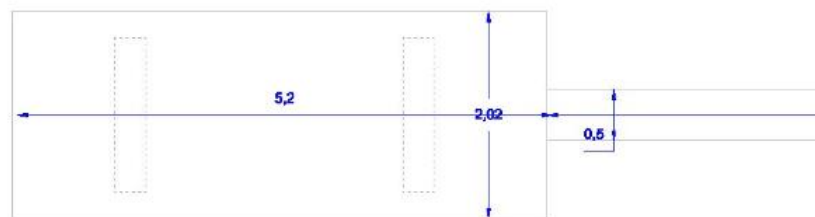
5.3 ALZADOS



Alzado frontal
e 1:10



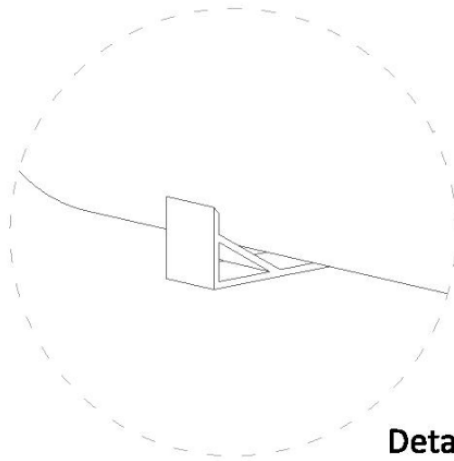
Alzado lateral
e 1:10



Planta
e 1:10

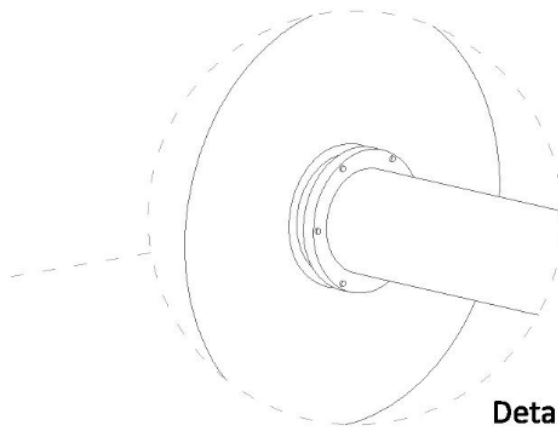
5.4 DETALLES

5.4.1 Detalle bancada depósito



Detalle bancada depósito

5.4.2 Detalle acople cañón a depósito



Detalle acople cañón a depósito



6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto de fin de carrera, se ha partido de una idea inicial, como es la de lanzar materiales de grandes dimensiones a altas velocidades para realizar ensayos de impactos, hasta llegar al diseño optimizado de la estructura requerida para que esto ocurriese.

En cualquier caso, no ha resultado un proceso sencillo, ya que el lanzador neumático estaba sometido a muchos factores, como las tensiones, rozamientos, condiciones externas, y más.

Gracias a los diseños anteriores de cañones, se ha partido de un diseño inicial, que con el paso de las páginas, se ha ido optimizando, hasta llegar al diseño final ensayado en Abaqus.

Es necesario recordar que en este diseño, se ponen especial interés en la zona referente a los sistemas continuos, por lo que la construcción final del lanzador, o la neumática quedan en un segundo plano. Es por eso por lo que el estudio de las velocidades y el ensayo cobra un interés especial.

Seguramente, este diseño en Abaqus deba de ser perfeccionado antes de su construcción, realizando un estudio aun más exhaustivo de las velocidades y de las tensiones en el estado de lanzamiento.

Lo que sí que está claro es que es una buena base para la construcción de cañones de grandes dimensiones que usan aire a altas velocidades para realizar ensayos de impactos, que con otro tipo de gases sería imposible de realizar por la inviabilidad del proyecto.



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Introducción a los lanzadores neumáticos.
http://centrodeartigos.com/articulos-noticias-consejos/article_139212.html
- [2] Velocidades del sonido según el medio gaseoso.
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/acustica/sonido/sonido.htm>
- [3] Proceso físico del lanzamiento de proyectiles en lanzadores neumáticos
http://www.en.wikipedia.org/wiki/Light_gas_gun#cite_note-2
- [4] Tipos de lanzadores neumáticos: cañón de gas ligero (básico y electro térmico)
http://www.en.wikipedia.org/wiki/Light_gas_gun#cite_note-2
- 5 Tipos de lanzadores neumáticos: cañón de combustión
http://en.wikipedia.org/wiki/Combustion_light_gas_gun
- 6 Tipos de lanzadores neumáticos: acelerador Ram
http://en.wikipedia.org/wiki/Ram_accelerator
- [7] Precedentes: Lanzadores neumáticos en la Universidad Carlos III.
<http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=60535>
- [8] Tabla de Coeficientes de Poisson en función de los materiales.
http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Constantes_el%C3%A1sticas_de_diferentes_materiales
- [9] Coeficientes de fricción en función de los materiales.
http://didactica.fisica.uson.mx/tablas/coefficients_of_friction.htm
- [10] Introducción al método de Euler
http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Euler
- [11] Libro de texto: AGARDograph 91(The theory of high speed guns)